المجلد 23 - العددان 3/2
فبراير/ مارس 2007

SCIENTIFIC
AMERICAN
February / March 2007

مجلة العلوم

الترجمة العربية لمجلة ساينتفك أمريكان
تصدر شهرياً في دولة الكويت عن
مؤسسة الكويت للتقدم العلمي



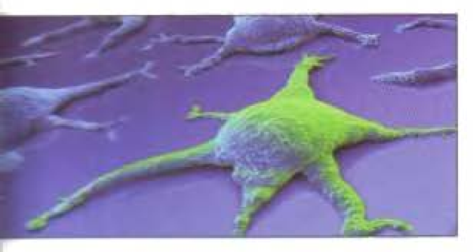
أسرار البراكين العملاقة



التلوث والخوض في الفضلات



تأثير برامج الطب العدلي (الشرعي)
التلفازية في قرارات المحلفين



هل الخلايا الجذعية
المسبب الحقيقي للسرطان؟

العددان 227/226 - السعر 1.500 دينار كويتي

فجر عصر
الإنسالية (الروبوتية)

ترجمة أو مراجعة

المقالات

«مجلة العلوم» تصدر شهريا في الكويت منذ عام 1986 عن «مؤسسة الكويت للتقدم العلمي»، وهي مؤسسة أهلية ذات نفع عام، يرأس مجلس إدارتها صاحب السمو أمير دولة الكويت. وقد أنشئت عام 1976 بهدف المعاونة في التطور العلمي والحضاري في دولة الكويت والوطن العربي، وذلك من خلال دعم الأنشطة العلمية والاجتماعية والثقافية. و«مجلة العلوم» هي في ثلاثة أرباع محتوياتها ترجمة لـ«ساينتفيك أمريكان» التي تعتبر من أهم المجلات العلمية في عالم اليوم، وتسعى هذه المجلة منذ نشأتها عام 1845 إلى تمكين القارئ غير المتخصص من متابعة تطورات معارف عصره العلمية والتقنية وتوفير معرفة شمولية للقارئ المتخصص حول موضوع تخصصه. تصدر «ساينتفيك أمريكان» بثماني عشرة لغة عالمية، وتتميز بعرضها الشيق للمواد العلمية المتقدمة وباستخدامها الفن المصور والرسوم الملونة والجداول.



أغرب الأقمار في المنظومة الشمسية(*)

نوع غريب من السواتل الكوكبية يسبح في مدارات متطاولة مائلة، يفتح نافذة نطل منها على طريقة تكوّن الكواكب.

<D. جيويت> ـ <S. S. شبيارد> ـ <J. كلينا>

قبل خمس سنوات، كان اثنان منا يمضيان وقت راحتهما في ليلة غائمة على ذروة جبل ماوناكيا، وذلك بتخمين عدد الأقمار التي لم تُكتشف بعد في المنظومة الشمسية. وقد راهن أحدنا (جيويت) بمبلغ 100 دولار على أن بمقدور مقراب متطور أن يكتشف 10 أقمار جديدة على الأكثر. وقد ذكر أن الفلكيين لم يكتشفوا طوال القرن العشرين كله سوى بضعة أقمار. أما <شبيارد>، فكان أكثر تفاؤلا، وتوقع ضعف العدد الذي خمنه زميله، وذلك استنادا إلى الحساسية المتعاظمة للآلات الفلكية الحديثة.

لقد أصبح <شبيارد> حاليا أغنى من قبل، إذ إن فريقنا اكتشف منذ تلك الليلة حتى الآن 62 قمرا يدور حول الكواكب العملاقة، وأكد اكتشاف المزيد منها في المستقبل. وقد عثرت مجموعات أخرى من الفلكيين على 24 قمرا إضافيا (وبالمصطلحات الفلكية الدقيقة، هذه **«سواتل»** satellites لا **«أقمار»** moons: ذلك أنه يوجد قمر واحد، هو ساتل الأرض. لكن، حتى الفلكيين يستخدمون عموما مصطلح «الأقمار» الشائع الاستعمال). ولم يتنبأ أحد بأن عائلة الشمس تضم عددا كبيرا من الأعضاء الذين يتوارون في الظلال. وقد وُصفت هذه الأعضاء بأنها **لانظامية** irregular، وهذا يعني أن مداراتها الإهليلجية متطاولة جدا ومائلة على مستويات استواء الكواكب التي تستضيفها. وما يسمى أقمارا **نظامية** regular، مثل الأرض، أو سواتل المشتري **الكاليلية** Galilean الكبيرة، فلها مدارات دائرية وصغيرة نسبيا واستوائية تقريبا.

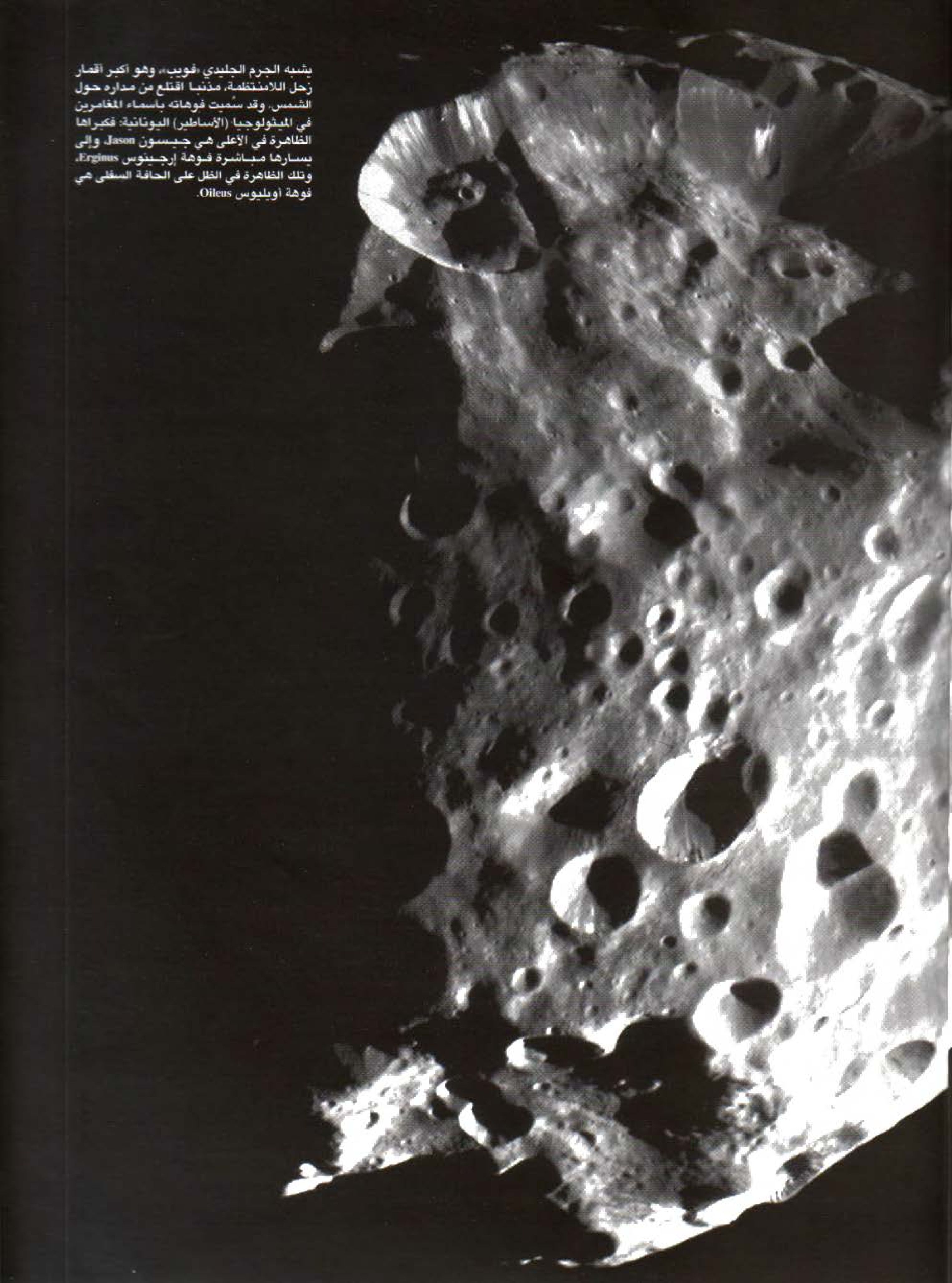
وما يزيد الأقمار اللانظامية غرابة أن لمعظمها **مدارات متراجعة** retrograde، أي إن كلا منها يدور حول كوكبه المضيف باتجاه معاكس لاتجاه دوران الكوكب حول محوره، خلافا للأقمار النظامية، التي لدورانها حول كواكبها المضيفة ولدوران هذه الكواكب حول محاورها، اتجاه واحد. وعلى سبيل المثال،

(*) العنوان الأصلي: THE STRANGEST SATTELITES IN THE SOLAR SYSTEM. لقد استخدمنا هنا الاسم الشائع أقمار بدلا من سواتل، حيث ـ كما يتبين في الفقرة الثانية من هذه المقالة ـ يوجد قمر واحد وهو ساتل الأرض. (التحرير)

(**) Overview: Irregular Moons

نظرة إجمالية/ الأقمار اللانظامية(**)

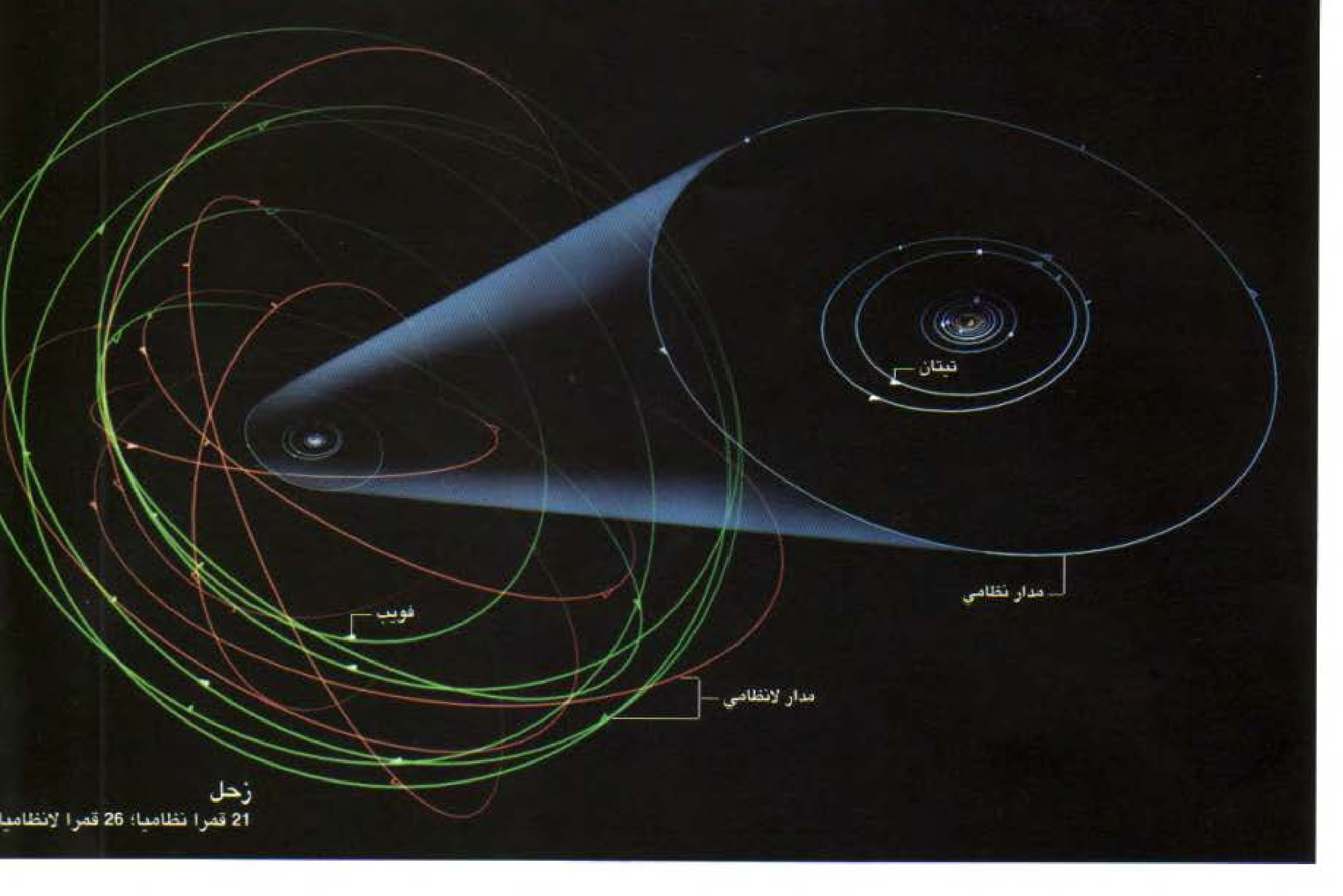
- **اعتاد الفلكيون الظن أن معظم أقمار الكواكب تكوّنت من الأقراص التي تحيط بكواكبها، تماما مثلما تكونت المنظومة الشمسية نفسها (من قرص من الغاز والغبار، تحول الجزء الخارجي منه إلى الكواكب)، ولكن بأبعاد صغيرة جدا. وتتحرك هذه الأقمار في مدارات واقعة في نفس مستوى استواء الكوكب الذي تدور حوله، وبنفس اتجاه دوران الكوكب حول محوره. أما الأجسام القليلة التي لا تلائم هذا النموذج، فقد اعتُبرت لامنتظمة.**
- **ويبين عدد كبير من المكتشفات الحديثة، التي تستعين بمكاشيف detectors رقمية متقدمة، أن عدد الأقمار اللامنتظمة أكبر من عدد الأقمار النظامية. وتشير مداراتها الطويلة المائلة الحلقية إلى أنها لم تتكون حيث هي حاليا، إنما كانت في مسارات تحيط بالشمس. وبصورة أساسية، هي كويكبات ومذنبات أسرتها الكواكب بطريقة ما.**
- **لم نصل بعد إلى فهم جيد، لا لمنطقة مصدر هذه الأقمار، ولا لآلية أسرها. فقد تكون الأقمار أتت من حزام كويبر الواقع وراء نبتون، أو من مناطق أقرب. وقد تتضمن عمليات أسرها تصادمات أو تفاعلات أخرى في منظومة شمسية أصغر سنا، وأكثف ازدحاما بالأجسام.**



يشبه الجرم الجليدي «فويب»، وهو أكبر أقمار زحل اللامنتظمة، مذنبا اقتلع من مداره حول الشمس. وقد سُميت فوهاته بأسماء المغامرين في الميثولوجيا (الأساطير) اليونانية: فكبراها الظاهرة في الأعلى هي جيسون Jason وإلى يسارها مباشرة فوهة إرجينوس Erginus، وتلك الظاهرة في الظل على الحافة السفلى هي فوهة أويليوس Oileus.

سرب من الأقمار(*)

كانت معرفتنا للمدى الكامل لنظام الأقمار حول زحل ضعيفة جدا، لكنها تغيرت في السنوات القليلة الماضية. فقد تبين أن هذه السواتل تنتمي إلى طائفتين كبيرتين: أقمار نظامية *(اللون الأزرق)* مثل تيتان ولابيتوس، التي لها مدارات صغيرة موجودة في مستو واحد، وأقمار لانظامية، مثل فويب، التي لها مدارات أوسع واتجاهات حركة متغايرة. فبعضها يدور بالاتجاه نفسه الذي يدور به زحل *(اللون الأحمر)*؛ وبعضها الآخر يسير بالاتجاه المعاكس *(اللون الأخضر)*. وثمة أنظمة مشابهة من الأقمار تحيط بالكواكب العملاقة الأخرى *(أقصى اليسار)*. وتعرض هذه المخططات اعتيانا **sampling** لعدد الأقمار الكلي.



فإن قمرا يُرى من موقع فوق القطب الشمالي للأرض أنه يدور بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة ـ وهو الاتجاه نفسه الذي تدور به الأرض حول محورها وحول الشمس. وتتحرك الكواكب الأخرى أيضا بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة، وهذا نمط من الدوران يعكس الحركة **الدوّامية** suirling لقرص الغاز والغبار، الذي يُفترض أن تكون هذه الكواكب نشأت عنه قبل 4.5 بليون سنة. وتشارك الأقمار النظامية كواكبها في اتجاه الحركة، لأن الفلكيين يظنون أنها تكونت من أقراص حول الكواكب المضيفة. لذا فإن السلوك المخالف للأقمار اللانظامية إشارة إلى أنها من أصل مختلف.

لا يمكن تقديم وصف جيد لهذه الأجسام بنماذج مألوفة، لكن ثمة مجموعة من الأبحاث النظرية الطازجة ماضية قدما في دراسة هذا الموضوع. ويبدو أن هذه الأقمار منتجات لحقبة انقضت قبل وقت طويل، عندما بعثر السُّحب التثاقلي(1) للكواكب المكوَّنة حديثا ـ أو اختُطف ـ أجساما صغيرة من مداراتها الأصلية. وتَعد دراسة هذه الأجسام بتسليط الضوء على المراحل المبكرة لنشوء المنظومة الشمسية وتطورها.

ومع أن أول قمر لانظامي جرى اكتشافه كان تريتون Triton، قمر نبتون، وذلك عام 1846. فلم يتيسر اكتشاف غيره من الأقمار اللانظامية إلا حديثا. إذ يغلب عليها أن تكون أصغر. وأخفت نورا من نظائرها من الأقمار النظامية. يُضاف إلى هذه المشكلة توزعها على رقعة شاسعة جدا من الفضاء. فمثلا. يبعد كالّيستو Callisto، أبعد أقمار المشتري النظامية، 1.9 مليون كيلومتر عن المشتري، في حين تبعد أقماره اللانظامية المعروفة قرابة 30 مليون كيلومتر عنه. وهذه المسافة قريبة من نصف قطر المجال التثاقلي للمشتري، أو **كرة هلْ** Hill sphere التي ما بَعْدها تختطف الشمس أي قمر طليق. وإذا كان من الممكن للعين رؤية كرة هلّ، لكانت الزاوية التي نرى ضمنها هذه الكرة 10 درجات ـ وهي أكبر 20 مرة من القطر الزاوي لقمر الأرض عندما يكون بدرا. وهذا عدد هائل مقارنة بحقول رؤية معظم المقاريب.

ويتطلب مسحُ مثل هذه المنطقة المترامية الأطراف للأقمار استعمال أحدث **المكاشيف** detectors الرقمية وأكبرها، وإجراء تحليل يصل إلى 100 جيكابتة من البيانات في الليلة *[انظر الإطار في الصفحة 10]*. وفي البداية، تركّز المسح المسمى Hawaii Moon Survey،

(*) A Swarm of Moons

(1) gravitational tug

المشتري
8 أقمار نظامية: 55 قمرا لانظاميا

أورانوس
18 قمرا نظاميا: 9 أقمار لانظامية

نبتون
6 أقمار نظامية: 7 أقمار لانظامية

على المشتري، الذي يسمح قربه منا بسبر أقمار صغيرة نورها أخفت من أن نتمكن من اكتشافها لو كانت تدور حول كواكب عملاقة أخرى أبعد من المشتري. وقد بذلت فرق يقودها <B. كلادمان> [من جامعة كولومبيا] و<M. هولمان> [من مركز هارفرد السميثسوني للفيزياء الفلكية (CfA)] و<J. J. كافيلارس> [من مجلس الأبحاث الوطنية التابع لمعهد هرزبيرگ الكندي للفيزياء الفلكية] جهودا متوازية لمسح زحل وأورانوس ونبتون.

وقد تبين أن لجميع هذه الكواكب العملاقة الأربعة، بصرف النظر عن كتلها، منظومات من الأقمار اللامنتظمة. وبتقدير **استقرائي** extrapolation مما اكتُشف حتى الآن، فإننا نقدر أن لكل من هذه الكواكب قرابة 100 قمر لانظامي، قطر كل منها أكبر من كيلومتر واحد؛ وتشغل أجسامها مجالا واسعا من الحجوم، لكن لمعظمها حجوم صغيرة. وفي حالة المشتري، فإن قطر أكبر أقماره اللامنتظمة أي J6 Himalia، يساوي 180 كيلومترا تقريبا، وقطر أصغرها يساوي كيلومترا واحدا أو كيلومترين.

إن مدارات هذه الأقمار من أكثر المدارات تعقيدا في المنظومة الشمسية. ولما كانت تطوف بعيدا جدا عن كواكبها المضيفة، فهي تُسحب من كلتا الثقالتين الكوكبية والشمسية، وهذا يجعل المحاور الكبرى لمداراتها الناقصية تدور بسرعة عالية، ما يجعل تمثيل مسارات هذه الأقمار بمنحنيات مغلقة غير دقيق. وبدلا من ذلك، فإن الأقمار تَرسم مسارات غريبة شبيهة بالأشكال التي تصنعها لعبة الأطفال spirograph.

إيقاع كوني متعدد[*]

عندما تعمل بالتزامن[1] التأثيرات المختلفة في الأقمار، يصبح الوضع معقدا جدا. فمثلا، إذا كان معدل **المبادرة**[2] precession لقمر قريبا من معدل دوران كوكبه المضيف حول الشمس، قيل إن القمر في حالة تجاوب «**تفاوتي**» evection resonance. هذا وإن الآثار المتواضعة للثقالة الشمسية تتراكم مع الوقت، ما يجعل المدار غير مستقر، فيتطاول القطع الناقص إلى مدى يؤدي إلى اصطدام القمر بالكوكب (أو بأحد أقماره الكبيرة)، أو إلى خروجه من كرة هِلّ ووقوعه في الأحضان التثاقلية للشمس. هذا وإن المدارات المتقدمة prograde أكثر عرضة للتأذي من المدارات التراجعية. فإذا كانت الأقمار اللامنتظمة معرضة في الأصل لأن تكون متقدمة أو متراجعة باحتمالين متساويين، فإن التجاوب التفاوتي قد يفسر السبب في كون معظم الأقمار هي حاليا متراجعة.

وثمة تجاوب آخر، يُعرف باسم **تجاوب كوزاي** Kozai resonance، يزاوج بين ميل المدار وشكله. فالأقمار التي تُفرض عليها مدارات مائلة تتحول مداراتها إلى قطوع ناقصة ممطوطة، ويُحتمل أن يؤدي هذا ثانية إلى قذفها خارجا أو تدميرها. وقد يكون هذا هو سبب عدم عثور الراصدين على أقمار ميولها تقع بين 50 و 130 درجة. واختصارا نقول إنه يبدو أن الأقمار اللامنتظمة، التي نراها في هذه الأيام، هي تلك التي نجت من التفاعلات التثاقلية التي قضت على كثير من أقمارها الشقيقة.

مازالت سمات أخرى للمدارات تتطلب عمليات خارج الثقالة. فالأقمار تنتمي إلى زمر، أو عائلات، متمايزة، لكل منها مدارات متشابهة. وعلى سبيل المثال، فإن عدد أقمار كل من زمر المشتري يصل إلى 17 عنصرا. وأوضح تفسير لهذا هو أن عناصر زمرة ما هي قطع من أقمار كبيرة تحطمت نتيجة صدمة، ومازالت تواصل حركتها في مدار تلك الأقمار الكبيرة. وإذا كان الأمر كذلك، فإن كثيرا من الأقمار اللامنتظمة التي نراها اليوم هي جيل ثان لأقمار سابقة.

هذا وإن <D. نسفورني> [من مركز أبحاث ساوث وست في بولدر بكولورادو] ومعاونيه، نمذجوا بالتفصيل تمزق الأقمار إربا إربا نتيجة حوادث التصادم، ووجدوا أن من النادر في هذه الأيام أن يتصادم قمر بقمر آخر، أو بجسم **بين كوكبي** interplanetary، كأن يكون مذنبا مثلا. لذا فإن وجود زمر الأقمار يُلمح إلى زمن بعيد كانت فيه مجموعة الأقمار اللامنتظمة أو مجموعة المذنبات (أو كلتاهما) أكبر مما هي عليه حاليا. كما كان تكرار التصادمات أكبر بكثير.

لقد أنجز الفلكيون بعض التقدم في كشف خاصيات أخرى للأقمار اللامنتظمة، وذلك إضافة إلى تعلم أشياء جديدة عن مداراتها. فمعظم الأقمار خافتة الضوء إلى درجة لم تسمح للفلكيين إلا بمعرفة القليل جدا عن تركيبها. بيد أن <T. كراف> [من CfA] و<T. ريتيك> [من جامعة نوتردام] وجدا أن الأقمار المنتمية إلى زمرة ما غالبا ما تكون ذات ألوان متشابهة. واللون أحد مظاهر التركيب، لذا فإن هذا الاكتشاف يقتضي وجود تشابه في التركيب - وهذا يقدم مزيدا من الدعم إلى الفكرة القائلة بأن أقمار زمرة ما هي شظايا جسم أكبر ولّى وانقضى.

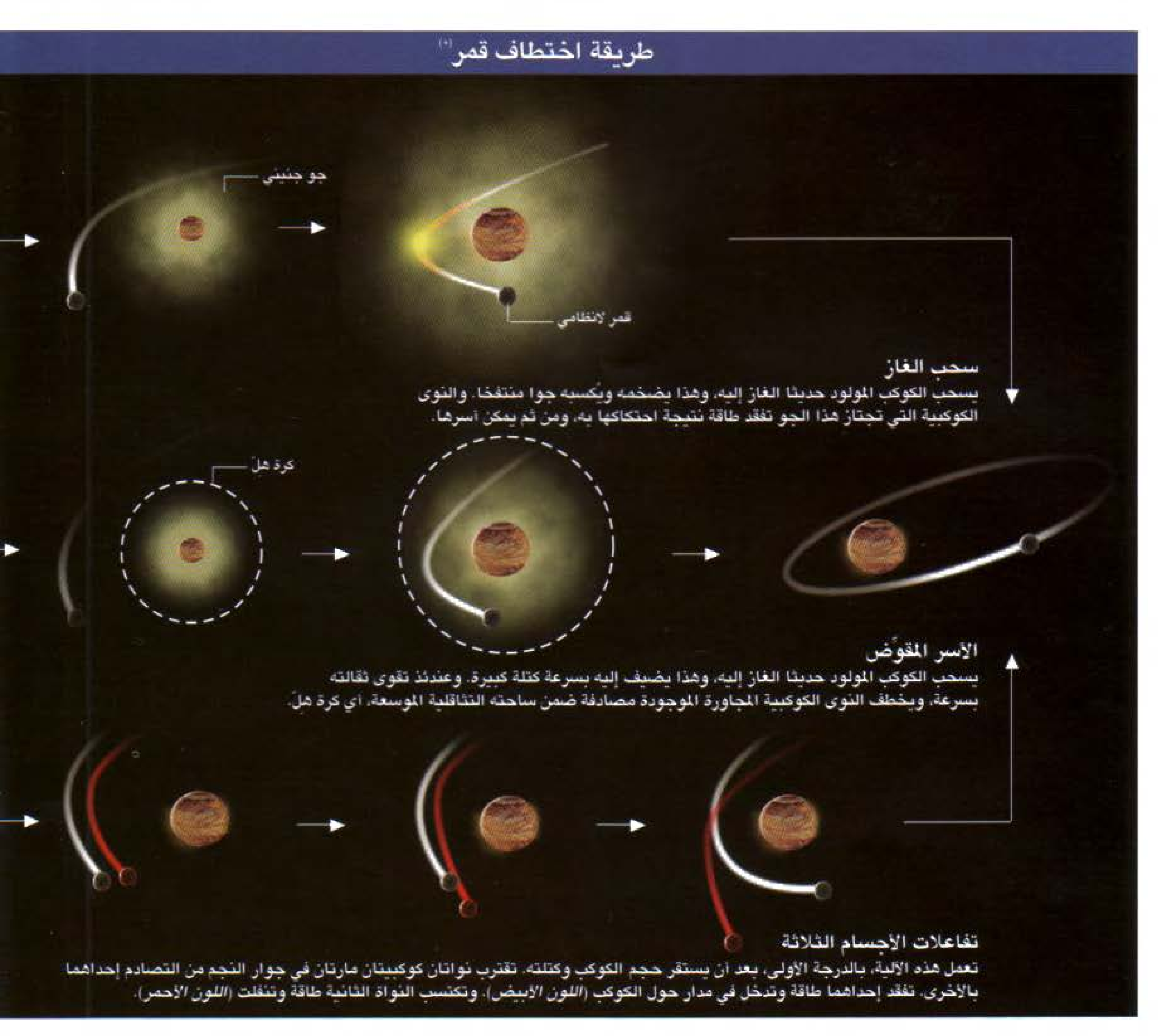
أحد الأقمار اللامنتظمة القليلة، الذي يعرفه الفلكيون بالتفصيل، هو قمر زحل فويب Phoebe، الذي زارته في الشهر 2004/6 السفينة الفضائية كاسيني التي أطلقتها الوكالة ناسا. وقد حصلت كاسيني على صور ذات ميز عال جدا، بينت أن

(*) Cosmic Polyrythm

(1) in synchrony

(2) هي التغير البطيء في اتجاه محور دوران (التحرير)

طريقة اختطاف قمر(*)



للفوهات التي تعلو سطح فويب وجودا كثيفا جدا. إضافة إلى ذلك، سجلت السفينة أطياف ضوء الشمس المنعكس عن فويب، التي بيّن تحليلها وجود جلائد من الماء وثنائي أكسيد الكربون. ولقمري نپتون اللاامنتظمين نيريد Nereid وتريتون Triton، اللذين رصدهما المسبار الفضائي ڤويجر 2، سطحان جليديان أيضا. وتلمح هذه الجلائد إلى أن هذه الأجرام تكوّنت على مسافات بعيدة نسبيا عن الشمس، مثل المذنبات. أما أقمار المشتري اللاامنتظمة فهي بسواد القارْ (الزفت)، وتبدو خالية من الجليد. وربما كان سبب ذلك كونها أقرب إلى الشمس، ومن ثم فهي أسخن من أن تسمح لوجود جليد مستقر عليها. وبهذا المعنى، تكون أقمار المشتري اللاامنتظمة شديدة الشبه بالمذنبات التي فقدت مركّباتها من المواد الطيارة.

يا له من جَرٍّ عنيف(**)

توحي خاصيات الأقمار اللاامنتظمة ـ وبخاصة مداراتها المتراجعة ـ أنها لم تتكون في الموقع الموجودة فيه. وبدلا من ذلك، فلابد أن تكون من مخلفات عمليات تكوّن الكواكب، مثل الكويكبات والمذنبات، التي كانت في الأصل تدور حول الشمس، ثم أسرتها الكواكب بطريقة ما. هذا وليس من السهل فهم كيف حدث ذلك. ففي التفاعل المعقد بين ثقالات الكواكب، تُجَرُّ الكويكبات والمذنبات روتينيا إلى مدارات قصيرة العمر حول الكواكب العملاقة. وهذا الأسر الموقت شبيه بسحب أوراق الشجر إلى دوامة في يوم خريفي عاصف. فهذه الأوراق تدخل الدوامة، وتدور في حركة دوامية ربما بضع عشرات من المرات، ثم تنفصل عنها بطريقة لا يمكن التنبؤ بها.

وكأمثلة على هذا النمط من الأسر، نورد المذنب الشهير D/Shoemaker-Levy (''D'' هو الحرف الأول من ''defunct''، أي «ميت»)، الذي دخل في مدار مؤقت حول المشتري في وقت ما من القرن العشرين، ثم صدم هذا

(*) How to Snag a Moon
(**) What a Drag



تشير الخاصيات المدارية الغريبة للأقمار اللامنتظمة إلى أنها نشأت في مدارات حول الشمس، ثم أسرتها الكواكب المضيفة الحالية في وقت لاحق. وقد اقترح العلماء ثلاث آليات للأسر.
المرحلة الأولية في هذه الآليات الثلاث جميعها هي تكوّن أجسام بحجم الكويكبات، تسمى نوى كوكبية. ويتجمع كثير من هذه النوى لتكوين القلوب الصخرية للكواكب العملاقة. وتبقى مخلفاتها معرضة للأسر.

الكوكب عام 1994 ولو لم يحدث له موت في غير أوانه، لقُذف هذا المذنب بعيدا ليدخل في مدار حول الشمس خلال بضع مئات من السنين ويعرف الفلكيون عدة أجسام أسرها المشتري مؤقتا، ثم عادت لتدور حول الشمس.

لكن لكي يتعرض جسم يسبح في مدار حول الشمس لأسر دائم في مدار مستقر حول كوكب ما، لابد من أن يفقد بعض طاقاته الابتدائية. من أجل ذلك، يتعين إبطاء سرعة الجسم لمنعه من الإفلات ثانية من الكوكب. هذا ولا وجود لأي عملية فعّالة لتبديد الطاقة في المنظومة الشمسية حاليا. لذا فإن أسر الأرض للقمر لابد أن يكون حدث قبل زمن طويل جدا، في وقت كان للمنظومة الشمسية فيه خاصيات مختلفة.

وفي السبعينات من القرن الماضي، اقترح المنظرون ثلاث آليات محتملة تعمل جميعها خلال حقبة تكوّن الكواكب أو بعدها مباشرة.

أما الآلية الأولى، التي اقترحها <J. P بولاك> و<J. A بيرنز> [اللذان كانا حينذاك يعملان في مركز أبحاث إيمز التابع للوكالة ناسا] و<M. E توبر> [من جامعة كورنل] فتذهب إلى أن الأقمار فقدت طاقة بفعل الاحتكاك الذي حدث لها خلال عبورها الأجواء الشاسعة للكواكب البدائية العملاقة الغازية. فالمشتري وزحل، خلافا للأرض والكواكب الأرضية الأخرى، مكونان، في المقام الأول، من الهدروجين والهليوم. والاحتمال الأكبر هو أنهما تكونا عندما سحب جسمٌ مركزي من الصخور والجليد، كتلته تعادل قرابة عشرة أمثال كتلة الأرض، كميات هائلة من الغاز من القرص البدائي المحيط بالشمس الفتية. وقبل أن يتخذ الكوكبان شكليهما الحديثين المتراصين نسبيا، فربما مرّا بمرحلة انتفاخ عابرة، كانت الأجواء خلالها تمتد مسافات أكبر مئات المرات من امتداداتها الحالية.

وفي طريقة گولديلوكس[1] الحقيقية، لابد أن يكون كويكب أو مذنب عابر لقي واحدا من ثلاثة مصائر مختلفة يحددها حجمه: فإن كان صغيرا جدا، احترق في الجو المنتفخ، مثلما يحدث للشهب. وإن كان كبيرا جدا، شق طريقه من دون أن يعيقه شيء، وتابع سيره في مدار حول الشمس. أما إذا كان معتدل الحجم، فإنه يتباطأ ويؤسر. وهذه العملية مماثلة تماما لإجراءات الكبح الهوائي، التي استعملها كثير من المسابير الكوكبية لدخولها في مدارات حول الكواكب.

تتمثل إحدى المشكلات التي يواجهها نموذج **السحب الغازي** gas-drag في أنه لا يفسر وجود سواتل لامنتظمة حول أورانوس ونپتون. هذان الكوكبان ليسا عملاقين غازيين، إنهما عملاقان جليديان ـ تغشاهما الصخور والجليد وطبقتان خارجيتان رقيقتان نسبيا من الهدروجين والهليوم. وبسبب بعدهما الشديد عن الشمس، والكثافة المادية المنخفضة في المناطق الخارجية من القرص المحيط بالشمس، فقد استغرق قلباهما زمنا أطول لبلوغ الكتلة الحرجة اللازمة لتعجيل حدوث انهيار غازي. وقبل أن يحدث ذلك، كانت الغيمة السديمية الشمسية قد تبددت كثيرا. لذا لم يتيسر قط لأورانوس ونپتون جوّان يحيطان بهما شبيهان بجوّي المشتري وزحل. تُرى، كيف يمكن للسحب الغازي العمل عند عدم توافر قدر كبير من الغاز؟

ويحدد الأسلوب الثاني أيضا أن وقت الأسر حدث خلال مرحلة نمو الكواكب. فلابد أن يكون تنامي الغاز على قلوب العمالقة الغازية جعل كتلها تتعاظم في عملية دعم ذاتي، وهذا يؤدي إلى زيادة مفاجئة في حجم كرة هلّ حول كل كوكب. ولن الكويكبات، وغيرها من الأجسام الأخرى التي جانبها الحظ لكونها قريبة في لحظة

(1) Goldilochs

راصدو السماء[*]

لما كانت الأقمار اللامنتظمة سريعة الاندفاع وصغيرة جدا وخافتة الضوء، فإنها تقع ضمن أصعب الأجسام رصدا في النظام الشمسي. ويتطلب العثور عليها أقوى مقاريب المسح في العالم ـ أي آلات تمسح مناطق واسعة من السماء، بدلا من الآلات التي تركز على بقاع منفردة محدودة. وقد توصل فريقنا إلى معظم اكتشافاته باستعمال المقراب Canada-France-Hawaii Telescope والمقراب Subaru Telescope المقام على جبل ماوناكيا بجزر هاواي. وهذان المقرابان مجهزان بمكاشيف رقمية لكل منها أكثر من 100 مليون پكسل.

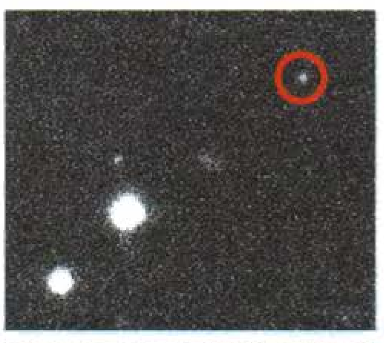
والمسألة المركزية هي تمييز الأجسام في المنظومة الشمسية عن النجوم والمجرات البعيدة. لهذا يستعمل الراصدون طريقتين، تُعنى أولاهما بقياس المسافة. ونحن نقارن ثلاث صور أُخذت للرقعة السماوية نفسها بحيث تفصل بين الصور فترة زمنية معينة. وخلال تلك الفترة، تقطع الأرض جزءا من مسارها حول الشمس، ما يجعل الأجسام تبدو أنها انزاحت من موقعها، وكلما كان الجسم أقرب، ازداد ظهور حركته.

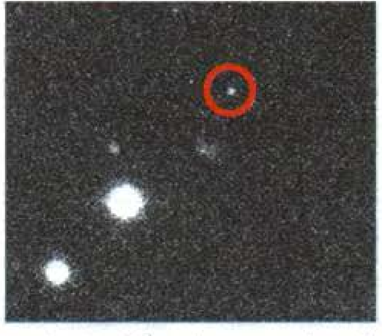
وتتضمن الطريقة الثانية قياسا للسرعة. وهنا نأخذ عشرات الصور لأحد الحقول، ونعالجها استنادا إلى السرعة المتوقعة المدارية للأقمار اللامنتظمة التي نبحث عنها، ثم نجمعها معا. وفي هذه الصورة المجمعة، تبدو نجوم الخلفية كعلامات خطية ضوئية، أما الأقمار اللامنتظمة فتبدو نقاطا ساطعة.

وبسبب استعمال هذه الطريقة عددا كبيرا من الصور لبقعة معينة من السماء، فهي أشد حساسية للأجسام الخافتة النور من الطريقة الأولى، لكنها تستغرق وقتا أطول لإجراء مسح كامل. وبغية التوثق من أن الأجسام هي أقمار لا كويكبات أو مذنبات، فنحن نراقبها عدة أشهر، ونعمل مع <B. مارسدن> من CfA للتحقق من أنها تدور حول كواكبها.



لمسح بقاع شاسعة من السماء، يُستعمل واحد من أفضل المكاشيف هو Subaru Prime Focus Camera، وهو مجموعة مكونة من 10 شيپات CCD لكل منها ثمانية ميكابكسل.





ثقب ضوئي صغير متحرك: اكتُشف ساتل المشتري S/2003 J14 في 2003/2/26 في هاتين الصورتين اللتين يفصل بين وقتي أخذهما 39 دقيقة. والأجسام الأخرى هي نجوم الخلفية. ولهذا القمر، الذي يُظن أن قطره كيلومتران تقريبا، مدار يبعد 13 مليون كيلومتر عن كوكبه العملاق.

هذا النمو الجاري بسرعة خاطفة، لابد أن تكون وجدت نفسها واقعة في شرك المد الواسع السريع لثقالة الكواكب. وكان أول من طرح فكرة آلية الأسر هذه <A. T. هيبنهايمر> و<C. پوركو> [اللذان كانا حينذاك في المعهد MIT] وقد أطلقا على الآلية اسما، محيرا إلى حد ما، هو **الأسر المقوَّض** pull-down capture.

بيد أن لهذه الآلية، كما هي الحال في السحب الغازي، مشكلة في تعليل الأقمار حول أورانوس ونپتون، اللذين لم يتعرض أي منهما لنمو سريع جدا في كتلته. وتشير معظم النماذج إلى أن هذين الكوكبين تناميا ببطء عن طريق تجميعهما لأجسام بحجم الكويكبات والمذنبات خلال زمن ربما استغرق عشرات أو مئات من ملايين السنين لبلوغ كتلتيهما الحاليتين. وحتى المشتري وزحل، فقد تعين عليهما التنامي خلال آلاف السنين لجعل عملية الأسر المقوض ناجحة، لكن كثيرا من المنمذجين متضايقون من مثل هذا الزمن القصير للتنامي. وثمة نموذج بديل لتكون أورانوس ونپتون اقترحه <A. بوس> [من معهد كارنيكي بواشنطن] هو أنهما ابتدا بضخامة المشتري وزحل، ثم تضاءلا تدريجيا بوساطة إشعاع مؤين من نجوم ضخمة قريبة. أما الأقمار اللانظامية ففهمها أصعب في هذا النموذج، لأن الكوكب الذي يتقلص غالبا ما يفقد أقماره بدلا من اختطافه لها.

وفي نموذجي السحب الغازي والأسر المقوض كليهما، جرى استحواذ أقمار لانظامية في مرحلة مبكرة من تاريخ المنظومة الشمسية، وربما كان ذلك قبل وصول الأرض إلى جسم يمكن تمييزه من غيره. وقد اقتُرح سيناريو ثالث مغاير جدا عام 1971 من قبل <R. كولمبو> و<F. فرانكلين> [اللذين كانا يعملان حينذاك في CfA]. فقد ذهبا إلى أن الاصطدامات بين جسمين في كرة هِل لكوكب ما، يمكن أن تبدد قدرا من الطاقة، وهذا يؤدي إلى أسر أحدهما. وقد لاقت هذه الفكرة، التي سُميت **أسر الأجسام الثلاثة** three-body capture، اهتماما قليلا نسبيا في السنوات الخمس والثلاثين الماضية، وربما كان ذلك يعود إلى الندرة الشديدة لهذه الاصطدامات حاليا.

بيد أن ثمة أبحاثا أحدث تبين أن لا ضرورة لحدوث اصطدامات. فلا تحتاج الأجسام الثلاثة إلا إلى أن تتفاعل تثاقليا. فإذا تبادلت طاقة فيما بينها، أمكن لأحدها كسب طاقة على حساب الجسمين الآخرين؛ وهذه العملية هي نموذج مضخم لمفعول المقلاع التثاقلي، الذي يستعمله مخططو البعثات الفضائية لتقوية دفع المسابير إلى أعماق الفضاء. وفي الشهر 2006/5، اقترح <C. أكنور> [من جامعة كاليفورنيا بسانتا كروز] و<D. هاملتون> [من جامعة ماريلند] صيغة أخرى لأسر الأجسام الثلاثة، مفادها أن جسما ثنائيا ينقسم إلى قسمين بفعل ثقالة كوكب، وهذا يؤدي إلى قذف أحدهما بعيدا، وسحب الآخر ليسير في مدار حول الكوكب.

(*) Watchers of the Skies

حركات كوكبية(*)

قد تكون آلية الأسر في الأجسام مثيرة في ضوء الاكتشاف الجديد، الذي يبين أن لجميع الكواكب العملاقة الأربعة توابع من الأقمار اللامنتظمة. وتنجح هذه الآلية في كل من **العمالقة الغازية** gas giants والعمالقة الجليدية. وهي لا تتطلب غلافا ضخما أو تناميا سريعا جدا للكواكب، وكل ما هي بحاجة إليه، عدد كاف من التصادمات التي تحدث قريبا من الكواكب. وربما كانت هذه الأنماط من التفاعلات هي الكبرى احتمالا قرب نهاية حقبة التكون الكوكبي. بعد أن تكون كرات هلّ قد نمت لتصل إلى حجومها الحالية، لكن قبل زوال الحطام المتخلف عن تكوّن الكواكب. وقد تكون آلية أسر الأجسام الثلاثة قادرة على تفسير سبب امتلاك كل كوكب العدد نفسه من الأقمار اللامنتظمة. فمع أن أورانوس ونبتون أقل ضخامة من المشتري وزحل، فإنهما أبعد عن الشمس، ومن ثم فإن حجمي كرتي هلّ التابعتين لهما متقاربان.

وحتى لو فسرت تفاعلات الأجسام الثلاثة كيفية أسر الأقمار اللامنتظمة، فمن أين أتت هذه الأقمار؟ هنا قدم الباحثون احتمالين مختلفين. فقد تكون هذه الأقمار كويكبات ومذنبات تكتلت في المنطقة نفسها من النظام الشمسي التي يقع فيها الكوكب الذي اختطفها في نهاية المطاف، والتي إما اندمجت في أجسام الكواكب، أو أسرتها المنظومة الشمسية. وكانت الأقمار اللامنتظمة محظوظة، لأنها لم تُلتهم، ولم ترسل للطواف في الفضاء الواقع بين النجوم.

وثمة احتمال آخر يبرز من نموذج حديث ظلت بموجبه المنظومة الشمسية مليئة بالحطام طوال قرابة 700 مليون سنة بعد تكون الكواكب. وإذا ذاك أحدثت **التفاعلات التثاقلية** gravitational interactions القوية بين المشتري وزحل اهتزازات زلزلت المنظومة كلها. وقد تبعثرت بلايين من الكويكبات والمذنبات، عندما اندفعت الكواكب الكبيرة إلى مداراتها الحالية التي هي أكثر استقرارا. ومن المحتمل أن يكون جزء من الأجسام المبعثرة قد أسر. وفي هذا السيناريو، الذي اقترحه عام 2005 «K. تسيكانس» وزملاؤه [من مرصد كوت دازور] تكون معظم الأجسام التي تعرضت لتلك الاهتزازات، وظلت طليقة وراء نبتون في حزام كويبر [انظر: حزام كويبر، **العلوم**، العددان 11/12 (1996)، ص 52]

ولابد أن تصبح القياسات الطيفية قادرة في يوم من الأيام على اختبار هاتين الفرضيتين. فإذا كان للأقمار اللامنتظمة للكواكب المختلفة تراكيب مختلفة، كان هذا دعما للفرضية الأولى، التي تكونت بموجبها الأقمار قرب كواكبها المضيفة. أما إذا كان لها تراكيب متشابهة، فإن هذا يقدم حجة على صحة الفرضية الثانية، التي تذهب إلى أن جميع الأقمار تكونت معا ثم تشتت. وهكذا فالأقمار يمكن أن تُبين ما إذا كانت المنظومة الشمسية قد خضعت لإعادة ترتيب عنيف.

إن استكشاف أنظمة الأقمار اللامنتظمة مازال جاريا على قدم وساق. وثمة شيئان واضحان: أولهما أن أسر هذه الأقمار لابد أن يكون قد حدث في وقت مبكر من تاريخ المنظومة الشمسية، إما خلال عملية التكون الكوكبي، وإما عقب تكون المنظومة مباشرة. هذا ولا تقدم المنظومة الشمسية الحديثة آلية ملائمة يؤدي عملها إلى أسر الأقمار. وثانيهما أن التشابهات القائمة بين مجموعات الأقمار اللامنتظمة لجميع الكواكب الخارجية الأربعة، توحي بأنها نشأت نتيجة تفاعلات الأجسام الثلاثة، وهي الآلية الوحيدة المعروفة التي فاعليتها في نبتون تعادل تقريبا فاعليتها في المشتري. وكما تساعدنا علامات الانزلاق، التي ترتسم على طريق بعد حادث سير، على تعرف كيفية حصول الحادث، فإن الأقمار اللامنتظمة، التي تطوف حول الكواكب العملاقة، تزودنا بمفاتيح لحل ألغاز تتعلق بأحداث سابقة لم يتسن لنا قط رصدها مباشرة. ■

(*) Planetary Movements



لقد أربك تريتون، قمر نبتون وأكبر قمر لامنتظم، العلماء منذ اكتشافه عام 1846. ويذهب بحث جديد إلى أنه كان، مع رفيق له، يدوران حول الشمس قريبين أحدهما من الآخر، وكأنهما متعانقان، إلى أن فصل نبتون بينهما، واحتفظ بتريتون قمرا له.

المؤلفون

David Jewitt - Scott S. Sheppard - Jan Kleyna

هم أغزر الباحثين العلميين في العالم إنتاجا في مجال اكتشاف الأقمار الكوكبية. وقد بدأت اهتمامات «جيويت» بعلم الفلك عندما كان في السابعة من عمره، حين أصيب بالدهشة لما رأى وابلا من الشهب في سماء المنطقة الصناعية شمال لندن المضاءة بمصابيح الصوديوم. وهو حاليا أستاذ في جامعة هاواي وزميل أكاديمية العلوم الوطنية. أما «شيبارد» الذي كان يشرف عليه «جيويت» عندما كان يتابع دراساته العليا، فقد أصبح حديثا، بعد حصوله على الدكتوراه، عضوا في قسم المغنطيسية الأرضية بمعهد كارنيگي في واشنطن. وقد ترعرع «كلينا» في مزرعة بولاية مين، وهو من هواة فن سينمائي غير مفهوم يسمى art-house. ويجري حاليا أبحاث ما بعد الدكتوراه في جامعة هاواي، حيث تتركز دراساته على ***المادة العاتمة*** *dark matter* ***والمجرات القزمة*** *dwarf galaxies*

مراجع للاستزادة

The Discovery of Faint Irregular Satellites of Uranus. J. J. Kavelaars et al. in *Icarus*, Vol. 169, No. 2, pages 474–481, June 2004.

Discovery of Five Irregular Moons of Neptune. Matthew J. Holman et al. in *Nature*, Vol. 430, pages 865–867; August 19, 2004.

Photometry of Irregular Satellites of Uranus and Neptune. Tommy Grav, Matthew J. Holman and Wesley C. Fraser in *Astrophysical Journal*, Vol. 613, No. 1, pages L77–L80; September 2004. Available online at **arxiv.org/abs/astro-ph/0405605**

Irregular Satellites in the Context of Giant Planet Formation. David Jewitt and Scott Sheppard in *Space Science Reviews*, Vol. 116, Nos. 1–2, pages 441–456; January 2005.

Cassini Imaging Science: Initial Results on Phoebe and Iapetus. C. C. Porco et al. in *Science*, Vol. 307, pages 1237–1242; February 25, 2005.

Neptune's Capture of Its Moon Triton in a Binary-Planet Gravitational Encounter. Craig B. Agnor and Douglas P. Hamilton in *Nature*, Vol. 441, pages 192–194; May 11, 2006.

Hawaii Irregular Satellite Survey Web site: **www.ifa.hawaii.edu/~jewitt/irregulars.html**

Scientific American, August 2006

ما يثير الاستغراب عند المشبك المناعي[*]

تكشف صور الخلايا المناعية أثناء التفاعل فيما بينها، عن وجود روابط[1] بنيوية تشبه تلك التي تستخدمها العصبونات للاتصال فيما بينها. وتقدم دراسة هذه المشابك[2] استبصارات جديدة عن كيفية قيام الخلايا المناعية بتكوين شبكة لتبادل المعلومات فيما بينها من أجل مقاومة الأمراض.

<M. D.> ديفيز

يعرف هواة الكتب الهزلية جيدا أن أكثر الطبعات توزيعا ورواجا هي تلك التي يظهر فيها أول مرة بطل خارق فائق القدرات. فعلى سبيل المثال، بيع حديثا في المزاد العلني الكتاب الهزلي الذي نشر في عام 1962 وظهر فيه الرجل العنكبوت أول مرة، بمبلغ 000 122 دولار أمريكي. ومن المحزن ألا تنال ـ في العادة ـ المطبوعات التي تعلن ظهور حقيقة علمية مهمة أول مرة أثمانا مماثلة، مع أن هذه المطبوعات الرائدة لها قيمة عظيمة لدى العلماء، حيث تثير في نفوسهم قدرا كبيرا من الإعزاز والتقدير.

وقد كانت هناك لحظة مماثلة عام 1995 عندما وقف <A. E.> كوبفر» [من المركز الطبي والبحثي اليهودي الوطني في دنفر] أمام بضع مئات من علماء المناعة الذي كانوا قد تجمعوا في واحدة من ندوات كيستون القيمة التي تحمل اسم هذا المنتجع الخاص بالتزحلق على الجليد بالولايات المتحدة الأمريكية. وقد تضمن عرض «كوبفر» أول صورة ثلاثية الأبعاد لخلايا مناعية تتفاعل فيما بينها. وشاهد المجتمعون في صمت مذهل ما عرضه «كوبفر» صورة تلو أخرى لبروتينات انتظمت على هيئة عين الثور عند نقط التماس بين الخلايا.

وقد استوعب الحاضرون هذه الصور في الحال من دون أي التباس على شاكلة المشابك التي تُكوِّن نقاط الاتصال الحرجة بين العصبونات في شبكات الاتصال العصبي، فإن نقاط التماس بين الخلايا المناعية اشتملت على تكدسات مرتبة من البروتينات. وكان واضحا للعيان وجود أطواق من الجزيئات تبقى على الخلايا ملتصق بعضها ببعض، وكذلك وجود عناقيد داخلية من البروتينات المتفاعل بعضها مع بعض وتخص التحاور بين الخلايا.

لقد سبق قبل الآن طرح فكرة أن الخلايا المناعية التي يجب أن تتبادل المعلومات فيما بينها وتخزنها أثناء سيرها للبحث عن المرض والاستجابة له، ربما تشترك مع الموصلات الشديدة البراعة ـ ألا وهي خلايا الجهاز العصبي ـ في بعض الآليات. ولكن هنا أقيم الدليل الذي يثبت وجود التراكيب التي تتفق مع النظرية. وما إن فرغ «كوبفر» من عرضه حتى دوت القاعة بتصفيق مطوّل تبعه وابل من الأسئلة.

وبعد ذلك بعقد من الزمن لاتزال هذه المشابك التركيبية التي تكونها الخلايا المناعية تثير أسئلة حول الكيفية التي تنتج بها الآلة الخلوية أو غيرها من القوى البنيان المشبكي، ومن ثم الكيفية التي يتسنى بها للبنيان المشبكي بدوره أن ينظم الاتصال بين خلية وأخرى. وكذلك كيف يمكن أن يؤدي خلله الوظيفي إلى الإصابة بالمرض. وحتى كيف يمكن للمُمْرضات أن تستغل تلك الآلية لصالحها.

لقد أمكن اكتشاف المشبك المناعي وأمكن متابعة استكشافه بفضل التقنيات المجهرية ذات الميز العالي[3] وتحسن طرق التصوير القديمة باستعمال الحاسوب. ولما كنا أدركنا أمورا ـ مثل التفكير في فكرة ما، أو الإحساس بلمسة ما، واكتشاف فيروس ما في مجرى الدم ـ تتطلب جميعها اهتزازات (رقصات)[4] مماثلة للجزيئات، فإن هذا الإدراك قد زودنا بإطار جديد لفهم المناعة.

بحث عن اتجاه[**]

منذ وقت طويل وقبل رؤية المشبك المناعي، كان واضحا احتمال أن تقدر الخلايا المناعية على تحقيق الاتصال فيما بينها. فقد عرف العلماء أن الخلايا المناعية تفرز جزيئات بروتينية تسمى السيتوكينات لتبادل المعلومات فيما بينها، ومع أنماط أخرى من الخلايا. ولكن بعض تلك الجزيئات على الأقل لا يعمل على ما يبدو كهرمونات تنتشر في أرجاء الجسم المختلفة باثة رسالتها على نطاق واسع. وبخلاف ذلك فإن السيتوكينات لا تكتشف في الدم، ويبدو أن عملها يقتصر على الخلايا المتماسة فقط.

وهذه القدرة على تبادل الإشارات الكيميائية مع خلية مجاورة محددة فقط دون غيرها أمر مهم بالنسبة للخلايا المناعية. فبخلاف العصبونات التي تميل إلى تكوين نقاط اتصال ثابتة وطويلة الأمد مع الخلايا الأخرى، تقيم الخلايا المناعية مع غيرها

(*) INTRIGUE AT THE IMMUNE SYNAPSE
(**) Seeking Direction
(1) connections أو وصلات.
(2) synapses. انظر شرح الشكل في الصفحة 15.
(3) high-resolution microscopy techniques
(4) choreography



تتجمع بروتينات (*باللون الأصفر*) عند نقطة التقاء خليتين مناعيتين من أجل تبادل المعلومات. فالبروتينات عند هذا المشبك تخبر إحدى الخلايا القاتلة الطبيعية[1] (*في الأسفل يسارا*) أن الخلية البائية (*في اليمين*) سليمة وينبغي الإبقاء عليها. أما بالنسبة للخلايا الأخرى التي تخفق في هذا الاختبار، فإن الخلية القاتلة الطبيعية تمتلك عضيات حامضية (*باللون الأحمر*) جاهزة للتحرك نحو المشبك وتسديد حقنة قاتلة.

تماسات سريعة الزوال أثناء تجوالها الدؤوب في الجسم بحثا عن علامات للمرض وتبادلا للمعلومات حول الأخطار الراهنة. فحينما تصادف خلية مناعية ما مكلّفة بتعرّف المرض خليةً أخرى، فقد لا يكون أمامها سوى دقيقتين لتقرير فيما إذا كانت هذه الخلية المستهدَفة سليمة أو لا. فإذا كانت غير سليمة فقد تلجأ الخلية المناعية ـ بحسب نوعها ـ إلى قتل الخلية المريضة مباشرة، أو إلى إطلاق إنذار استدعاء لجنود مناعيين آخرين للحضور وإتمام المهمة. وقد يؤدي خطأ في الاتصال إلى جعل الخلايا المناعية تقتل خلايا سليمة بطريق الخطأ، مثلما يحدث في أمراض المناعة الذاتية ومنها داء التصلب المتعدد، أو قد يؤدي إلى السماح للخلايا السرطانية بالاستمرار في النمو والتكاثر من دون ضابط. ولذلك فإن علماء المناعة لديهم اهتمام شديد، ليس فقط باكتشاف ما هي الجزيئات المشتركة في هذه الحوارات، ولكن أيضا بكيفية تفاعلها لتتمكن من اتخاذ مثل تلك القرارات الحاسمة.

في أوائل ثمانينات القرن الماضي، شرح العلماء في مختبر علم المناعة التابع للمعاهد الوطنية للصحة في الولايات المتحدة فكرةَ وجود سطح بنيوي فاصل يمكن للخلايا المناعية من توجيه ما تفرزه سيتوكينات إلى خلية أخرى. ولما كانت الأغشية الخلوية ـ المكوَّنة إلى حد كبير من جزيئات دهنية

(1) natural killer (NK) cell

وبروتينية - هي أغشية سائلة، فإن البروتينات يمكنها بالتأكيد أن تتحرك بسهولة إلى نقطة التماس بين خليتين لتكوّن بنيانا منتظما هناك على غرار ما يحدث عندما تنشئ العصبونات وصلة مع خلية أخرى.

لقد انبثقت فرضية مجموعة المعاهد الوطنية للصحة نتيجة تجارب حاسمة أظهرت أن تكدّس وتعنقد بعض البروتينات النوعية معا عند سطح الخلايا المناعية المسماة الخلايا التائية كان كافيا ليثير تنشيط تلك الخلايا. وفي نشرة علمية ظهرت في عام 1984، بيّن <A .M> نوركروس> [أحد باحثي المعاهد الوطنية للصحة] أول مرة الخلايا التائية بإضافة أحد المنبهات إلى المحلول الموجود على أحد جانبي الغشاء فقط؛ فبدأت تلك الخلايا بإفراز بروتينات نحو مصدر المنبه وليس نحو المحلول الخالي من المنبه على الجانب الآخر من الغشاء.

وفي عام 1994، شجعت هذه الملاحظة الأساسية <W .A> بول> و<R .A> سيدر> [الباحثين في المعاهد الوطنية للصحة] على إحياء فكرة كون المشبك المناعي رابط اتصال بين الخلايا المناعية وغيرها من الخلايا. وقد وصفا هذا المشبك بأنه سطحان خلويّان متقاربان تقاربا وثيقا ومزوّدان بتنظيم مرتب الفيروسات على سبيل المثال.[1] ثم عرض شدف (كسرات) هذه البروتينات على الخلايا التائية، التي تنشط بدورها حينما تتعرف أحد المستضدات. ومن ثم أطلق <كوبفر> مصطلح عناقيد التنشيط فوق الجزيئية[3] على الجزيئات البروتينية ذات نسق عين الثور التي تتكون عند السطح الفاصل للخليتين.

وكذلك أجرى <M. دستي> و<P. ألين> و<A. شو> [من كلية طب جامعة واشنطن في سانت لويس] ومعهم <M. ديفز> [من جامعة ستانفورد] كل على حدة، تصويرا لظاهرة تنشيط الخلية التائية ولكن بوسيلة مثيرة

وأخيرا، وجدت تراكيب توافق النظرية.

بشكل رسمي إمكانية أن يكون للجهازين العصبي والمناعي آلية مشتركة للاتصال من خلال المشابك. ولكن لسوء الحظ ظهرت هذه النشرة العلمية في مجلة غير مقروءة على نطاق واسع، وحُذف منها بعض التفاصيل، ولذلك سرعان ما تعرض ذلك النموذج المشبكي المبكر للاتصال بين الخلايا للنسيان. ومع هذا بقي الفضول وحب الاستطلاع فيما يتعلق بإمكانية أن توجه الخلايا التائية رسائل من عدمه وكيفية قيامها بذلك.

وفي عام 1988 أجرى الراحل <A .Ch> جانواي، جونير> وزملاؤه [في جامعة ييل] تجربة جميلة تؤكد أن الخلايا المناعية يمكنها بالفعل أن تفرز البروتينات في اتجاه معين. فقد قاموا بتثبيت بعض الخلايا التائية تثبيتا محكما داخل مسام غشاء، يوجد في فجوة تحتوي على محلول وتقسمها إلى جزأين، ثم قاموا بتنشيط مكون من مستقبلات بروتينية على سطح إحدى الخليتين يقابلها على سطح الخلية الأخرى الملاسة لها التركيب المربوط معها. ولما كانت الخلايا المناعية تتجول أكثر من العصبونات بكثير، فقد تحدث <بول> عن المشبك المناعي على أنه اتحاد «وصل وقطع»[1] على النقيض من حال الروابط (الوصلات) العصبونية الطويلة الأمد.

وهكذا في منتصف التسعينات من القرن الماضي استقر مفهوم المشبك المناعي كتصور مثير، ولكن مازالت هناك حاجة إلى رؤيته عن طريق التجارب كتركيب حي. وبعد ذلك عرض <A. كوبفر> مجموعة شرائحه في ندوة كيستون، حيث أظهرت صوره التفاعلات بين خلايا مناعية تسمى الخلايا العارضة (المقدمة) للمستضد[2] والتي تخصصت في تفتيت بروتينات العنصر المعتدي، مثل للاهتمام. فبدلا من مراقبة خليتين متفاعلتين معا، لجؤوا إلى الاستعاضة عن الخلية العارضة للمستضد بغشاء بديل مؤلف من جزيئات دهنية مستخلصة من خلية حقيقية جرى تسطيحها على شريحة زجاجية؛ ثم أضافوا إلى هذا الغشاء الدهني المسنود إلى الزجاج البروتينات الرئيسية الموجودة عادة على سطح الخلايا العارضة للمستضد والتي صُبغ كل منها بصبغ متألق مختلف اللون[4]؛ ثم قاموا بعد ذلك بمراقبة تنظيم هذه البروتينات الموسومة أثناء هبوط الخلايا التائية على الغشاء. (انظر الشكل العلوي في الصفحة 16).

وكذلك شاهدت مجموعة <داستن> ظهور نسق البروتينات على شكل عين الثور حينما كانت الخلايا التائية تقوم بمعاينة للبروتينات داخل الغشاء المسنود على الزجاج. وكان من الواضح أن المشبك البنيوي لم يكن يتطلب تضافر جهود خليتين، وإنما يمكنه أن يتكون وإحدى الخلايا المناعية تتماس مع مجموعة صنعية من البروتينات وتستجيب لها.

وقد كشف هذا العمل أيضا أن المشبك نفسه يتصف بالديناميكية[5]: يتغير ترتيب البروتينات مع استمرار الاتصال بين

نظرة إجمالية/ الحوار المنسّق(*)

- كشفت صور المجهر العالي الميز لخلايا مناعية وهي تتلامس مع خلايا أخرى عن وجود تراكيب غشائية مؤقتة شبيهة بالروابط (الوصلات) المشبكية التي تقيمها الخلايا العصبية بعضها مع بعض للاتصال فيما بينها.
- إن الاستقصاءات لهذه المشابك الخلوية المناعية تركز على الآليات التي يمكن أن تتحكم في هيئتها وكيفية تعديلها للاتصال بين الخلايا.
- تعد مشاهدة التفاعلات بين الخلايا المناعية المنفردة في وقت حدوثها الحقيقي وسيلة جديدة لفهم كيفية مشاركتها ومعالجتها للمعلومات من أجل الدفاع عن الجسم ضد الأمراض.

(*) Overview/ The Structured Dialogue
(1) "make and break" union
(2) antigen-presenting cells (APCs)
(3) superamolecular activation clusters
(4) different colored fluorescent dye
(5) أي يتميز بتغير مستمر

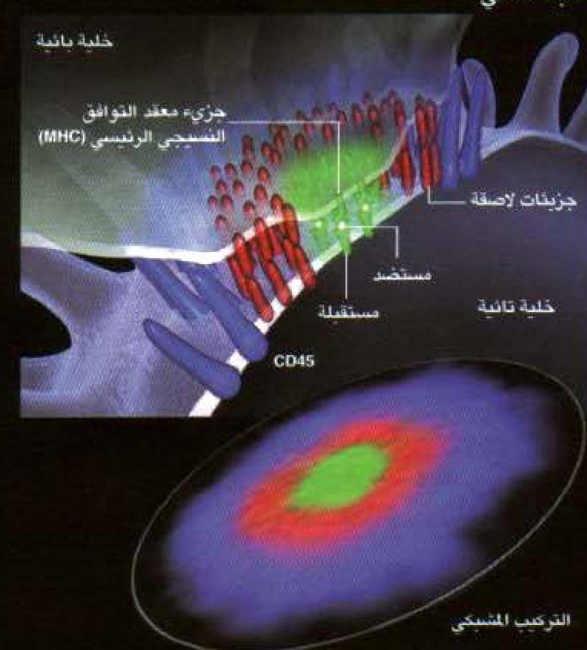
المشابك عن قرب(*)

إن المشبك ـ الذي اشتق اسمه باللغة الإنكليزية من كلمتين إغريقيتين تعنيان «التلاصق معا» و«إحكام الربط» ـ هو نقطة التماس التي تتبادل عندها خليتان إشارات جزيئية وتكونان في الأغلب مرتبطتين فيزيائيا إحداهما بالأخرى بواسطة بروتينات رابطة. وعادة ما تكون هذه الروابط طويلة الأمد بين العصبونات فيما تقيم الخلايا المناعية روابط مؤقتة من أجل حوارات سريعة. ويمكن أن تتنوع أشكال المشبك المناعي بحسب نمط الخلية. ويسير تكون تلك المشابك المناعية في مراحل، وهذا يمكنها كذلك من تنظيم الحديث بين الخلايا.

أوجه الشبه بين المشابك

في المشبك التقليدي بين عصبونين تمسك البروتينات اللاصقة غشاءي الخليتين المتفاعلتين معا وتجعلهما ملتصقين التصاقا وثيقا. وعندما يُنبّه العصبون الأول تتحرك رزم من الجزيئات الناقلة للإشارات (وتدعى الناقلات العصبية) نحو الغشاء لتطلق محتوياتها التي ترتحل إلى المستقبلات الموجودة على العصبون الآخر. كما تمسك الجزيئات اللاصقة الموجودة بالمشبك الغشاءين الخلويين وتجعلهما متلاصقين تلاصقا وثيقا، فيما تتفاعل معا أنواع أخرى من البروتين. وفي هذا المثال تعرض جزيئات معقد التوافق النسيجي الرئيسي[1] الموجودة على الخلية البائية شدفا (كسرات) بروتينية تدعى المستضدات أمام مستقبلات الخلية التائية[2]. وتنتقل البروتينات التي تدعى CD45، وهي عادة ما تثبط الإشارات، بعيدا إلى محيط المشبك. وعندما نرى التراكيب المشبكية وكأننا ننظر إليها من داخل إحدى الخليتين، فسوف نجد أنها تشبه نسق عين الثور.

مشبك مناعي

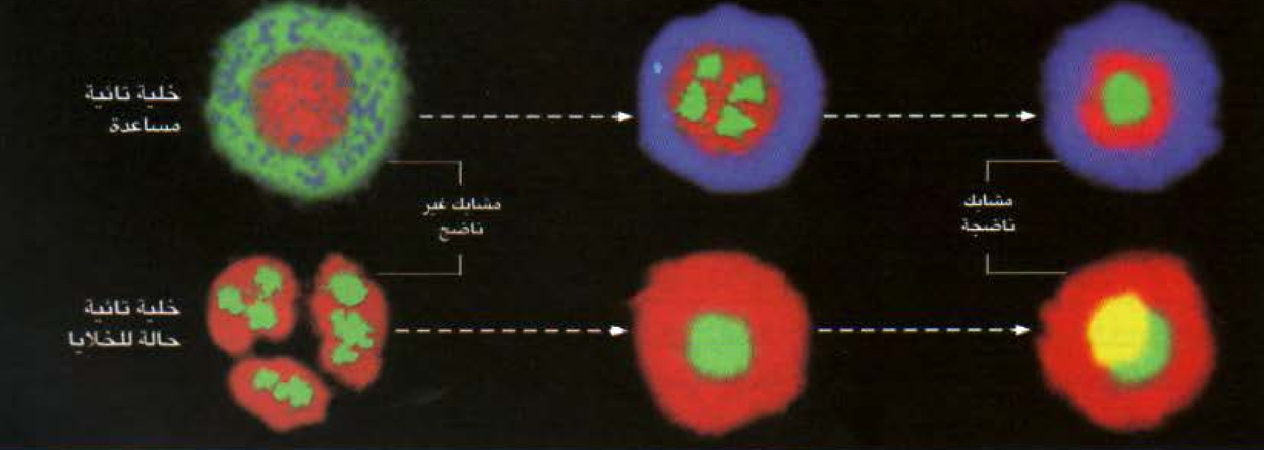


مشبك عصبي

ناقلات عصبية
جزيئات لاصقة
مستقبلة
التركيب المشبكي

تطور ديناميكي (حركي)

يبتدىء تكون مشبك «الخلية التائية المساعدة» بتجمع وتعنقد الجزيئات اللاصقة (*باللون الأحمر*) عند مركزه والمستقبلات (*باللون الأخضر*) على شكل حلقة خارجية. وهذا الترتيب سوف ينعكس في المشبك الناضج، بحيث تشكل بروتينات CD45 (*باللون الأزرق*) الحلقة الخارجية القصوى. وهناك نمط آخر من الخلايا المناعية، وهو الخلية التائية «الحالة للخلايا»[3]، مسؤول عن قتل الخلايا غير السليمة. فحينما يصادف هذا النوع خلية غير سليمة، تبدأ مستقبلاته وبروتيناته اللاصقة تتجمع ثم تشكل حلقة. وأخيرا، تنتقل حبيبات تحتوي على جزيئات سامة (*باللون الأصفر*) من داخل الخلية إلى مركز المشبك لإطلاق حمولتها القاتلة. ويرغب الباحثون في معرفة الدور الذي يمكن أن تؤديه مراحل تكوين المشبك هذه في تنظيم الاتصال بين الخلايا المناعية.



(*) Synapses UP Close
(1) major histocompatibility complex (MHC)
(2) T cell's receptors
(3) cytolytic T cell

0.5 دقيقة 1.5 3 5 10 30 60

في واحدة من تجارب التصوير المبكرة لاستكشاف تركيب المشبك المناعي، استخدم <M. دستن> وزملاؤه بروتينات موسومة وسما متألقا (وميضا) داخل غشاء خلوي صنعي. واتخذت تلك البروتينات تكوينا (تشكيلا) مشبكيا عندما بدأت خلية تائية غير مرئية في الجانب المقابل من هذا الغشاء تتفاعل معها. أولا تكون البروتينات الحاملة للجزيء الشبيه بالمستضد (*باللون الأخضر*) حلقة خارجية وتتجمع الجزيئات اللاصقة (*باللون الأحمر*) عند المركز. وعلى مدى ستين دقيقة ينعكس هذا الترتيب محاكيا مراحل التفاعل بين الخلية التائية والخلية الحقيقية العارضة للمستضد في المشبك المناعي.

الخلايا. فعلى سبيل المثال، شوهدت أول مرة مستقبلات الخلية التائية أثناء تفاعلها مع المستضد وهي تتراكم أولا في حلقة تحيط بعنقود (تجمع) مركزي من البروتينات اللاصقة مكونة بذلك مشبكا خلويا غير ناضج للخلية التائية. وفي مرحلة لاحقة انعكس وضع هذه البنية بحيث كونت الجزيئات اللاصقة في المشبك الناضج حلقة خارجية من عين الثور وأحاطت بعنقود داخلي من مستقبلات الخلية التائية المتفاعلة.

ومنذ أن نشر <كويفر> و<داستن> صورهما الأولية لمشبك الخلية التائية، شوهدت كذلك مجموعة متنوعة من النسق البنيوية المشبكية بين أنماط أخرى من الخلايا المناعية. وفي الواقع، كان إسهامي الخاص أثناء عملي مع <د. سترومنجر> [من جامعة هارڤرد] في عام 1999 هو مشاهدة مشبك بنيوي يكونه نوع مختلف من خلايا الدم البيض يعرف باسم الخلية القاتلة الطبيعية (بالفطرة). وقد أفاد هذا الإسهام في تأكيد عمومية مشاهداتهما. ويُعد استكشاف كيفية حدوث مثل هذه الترتيبات المتغيرة للجزيئات وكذلك كيفية تحكمها في الاتصالات بين الخلايا هو العلم الجديد الذي أتاحه مفهوم المشبك المناعي.

كشف غموض شفرة الرقص(*)

على الفور أدت مشاهدات بنية المشابك المناعية إلى تحفيز الباحثين على استكشاف السبب الذي جعل البروتينات الخلوية تتحرك إلى نقاط التماس بين الخلايا وتنظم نفسها في أنساق معينة. إحدى ناقلات (موجهات) تحركات البروتينات في جميع الخلايا هي شبكة لافتة للنظر من الخيوط المهمة تسمى الهيكل الخلوي الذي يتألف من سلاسل طويلة من البروتينات تستطيع التمدد والانكماش من حيث الطول. ولما كان هذا الهيكل الخلوي مثبتا ومشدودا إلى سطح الخلية بوساطة بروتينات موجهة، فهو يستطيع دفع الغشاء الخلوي أو جذبه، فتتمكن بذلك العضلات من التقلص و**النطاف** sperms من السباحة.

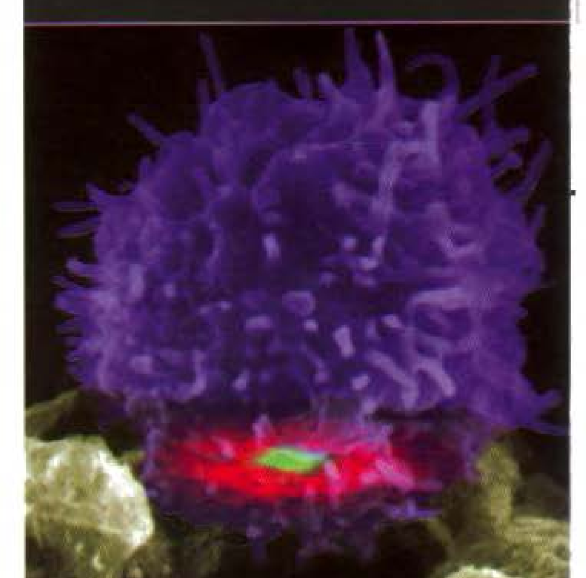
لقد أظهرت التجارب أنه عندما يتم تعطيل الهيكل الخلوي بالذيفانات (التوكسينات) تصبح بعض البروتينات غير قادرة على التحرك نحو المشبك المناعي، وهذا يوحي بأن حركات خيوط الهيكل الخلوي تسمح للخلايا بأن تتحكم في مكان تكدس البروتينات عند المشبك وزمنه.

هناك على الأقل أليتان أخريان يمكنهما أن تؤديا دورا في تنظيم البروتينات عند المشبك، ولكن مدى تأثيرهما في الاتصال بين الخلايا المناعية يظل مثيرا للجدل. وهناك مجموعة من المقترحات تفترض وجود منصات صغيرة مؤلفة من بضعة جزيئات بروتينية يمكن أن يتكدس كل منها في الأغشية الخلوية، وتستطيع أن تتحرك حول سطح الخلية على الأرجح بمساعدة الهيكل الخلوي. وحينما تتجمع هذه «الطوّافات الجزيئية»(2) في المشبك مع البروتينات المستقبلة الرئيسية التي تكتشف المرض في خلية مقابلة، فإن التفاعل بينها يمكن أن يكون سبب تنشيط الخلية المناعية. ولكن هذه المنصّات الموجودة سابقا هي محل نزاع، لأنها أصغر من أن تُرى مباشرة بوساطة المجهر الضوئي، ومن ثم يكون الدليل على وجودها غير مباشر نوعا ما.

وهناك احتمال آخر مثير للاهتمام وعليه أدلة مباشرة وغير مباشرة. ويتمثل هذا الاحتمال في أن الحجم الفيزيائي لكل نوع من البروتينات المكونة للمشبك يمكن أن يؤدي دورا مهما في تحديد وجهة سيره عندما تتلامس الخلايا. فحينما ترتبط البروتينات الموجودة على خلية ما بنظائرها على الخلية المقابلة، يتقارب الغشاءان الخلويان أحدهما من الآخر، وتتطابق الفجوة المتبقية بينهما مع حجم البروتينات المترابطة. وهكذا تستطيع الكداسة المركزية المكونة من بروتينات صغيرة أن تقرب الغشاءين بقدر يكفي لعصر البروتينات الأكبر حجما وطردها.

(*) Deciphering the Dance
(1) dendritic cell
(2) molecular rafts

تتصل الخلايا المناعية لتبادل المعلومات، ويترتب على هذا أن تصبح الخلية التائية (*باللون الأزرق*) نشطة إذا ما تعرفت مستضدا تعرضه أمامها الخلية التغصنية(1) الأكبر منها حجما (*باللون الذهبي*). ففي هذه الصورة المجهرية الإلكترونية المندمجة مع صورة متألقة (وميضة) لخلية حية، ترى مستقبلات الخلية التائية المتفاعلة مع المستضد وهي تتجمع عند مركز المشبك (*باللون الأخضر*)، وحلقة مكونة من جزيئات لاصقة (*باللون القرمزي*) وهي تمسك بالخليتين معا.



ومن ثم عزل أنماط مختلفة من البروتينات في مناطق مختلفة من المشبك.

لقد استخدم «A. شكرابورتي» وزملاؤه [من جامعة كاليفورنيا في بركلي] نموذجا رياضياتيا لاختبار هذه الفكرة بتقييم نتيجة تفاعل بروتينات مختلفة الأحجام عبر غشاءي خليتين متقابلتين. ومع أن «شكرابورتي» ليس متخصصا بعلم المناعة، فقد أوضح وهو المتخصص بالرياضيات أنه أصبح مفتونا بالنسق الحيِّزية (المكانية) التي تأسر الألباب والتي يمكن أن تكونها خلاياه المناعية عندما يصاب بالإنفلونزا. وترجح تحليلات مجموعته البحثية أن اختلاف الحجم بين البروتينات قد يكون كافيا بالفعل لجعل البروتينات الكبيرة والصغيرة تتجمع في مناطق منفصلة من المشبك المناعي.

وبالطبع يريد المتخصصون في علم المناعة أن يعرفوا كذلك ما الذي تعنيه هذه التحركات البروتينية في سياق الكلام عن الاتصال بين الخلايا المناعية، إن كان لها أي معنى. قد يكون الجواب «لا شيء»؛ إن أقدم مفهوم للمشبك المناعي يتمثل في كونه نوعا من الحبال التي تمكن الخلايا المناعية من توجيه إفرازاتها من السيتوكينات إلى الخلية المستهدفة. ولكن المثير للاهتمام هو تزايد الأدلة التي ترجح أن المشبك المناعي يمكن أن تكون له وظائف أخرى بحسب الخلايا المتشابكة. ويمكن أن تتضمن تلك الوظائف بدء الاتصال أو إنهاءه، أو المساعدة على تعديل

في هذه الصورة، يجذب الانتباه خليتان قاتلتان (*في اليمين*) وهما تستعدان لتدمير خلية مريضة (*في المركز*). تتجمع وتتعنقد بروتينات سامة حالّة[1] (*باللون الأخضر*) عند المشبك بين الخلايا التائية والخلايا المستهدفة بعد أن تم نقلها إلى هناك بواسطة البروتينات الخلوية الهيكلية المسماة الأنيبيبات الميكروية (المجهرية)[2] (*باللون الأحمر*). وستُحقن البروتينات الحالة في الخلية المستهدفة عبر مركز التراكيب المشبكية التي قد تمنع أيضا الخلايا التائية من أن تسمم نفسها.

استجابة لدى الخلية التائية.

وإضافة إلى ذلك، أظهر «شاو» و «ألين» ومعهما «داستن» [الموجود في جامعة نيويورك] ومساعدوهم أن إرسال الإشارات الفعال فيما بين الخلايا التائية والخلايا العارضة للمستضد يبدأ قبل أن تتجمع مستقبلات الخلية التائية في موضعها المستقبلات بعيدا عن غشائها الخلوي أثناء إرسال الإشارات. تستطيع الخلايا التائية منع نفسها من فرط تنبيه مميت قد تسببه كثرة المستضدات. وقد أظهرت التجارب أن الخلايا التائية تستطيع تقليل عدد المستقبلات الموجودة في التركيب البنياني للمشبك كي تقلل تبادل الإشارات. أما في

يمكن لهذه النُّسق أن ترسل المعلومات أو تعكسها على الأقل.

حجم الإشارات بين خليتين إذا جاز التعبير.

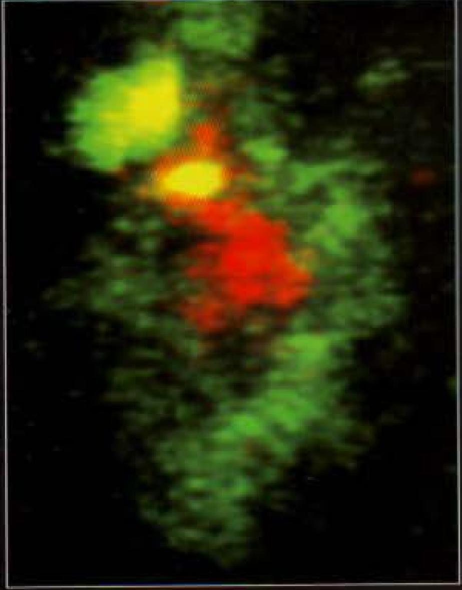
ففي عام 2002 لاحظ «كوبفر» (الموجود حاليا في كلية الطب بجامعة جون هوبكنز) على سبيل المثال أن تبليغ الإشارات فيما بين خلية تائية وأخرى عارضة للمستضد أمام عناقيد التنشيط فوق الجزيئية يبدأ بأخذ شكل التصاق ناشئ بين الخليتين، ولكن وجود عناقيد التنشيط فوق الجزيئية ضروري لجعل التفاعل بين الخليتين يحدث النهائي في مركز المشبك. وبالفعل، يتم جزء من الاتصال قبل أن يتكون التركيب الناضج. وهذا يعني أن نسق المشبك الناضج يمكن أن يرسل إشارة إنهاء الاتصال.

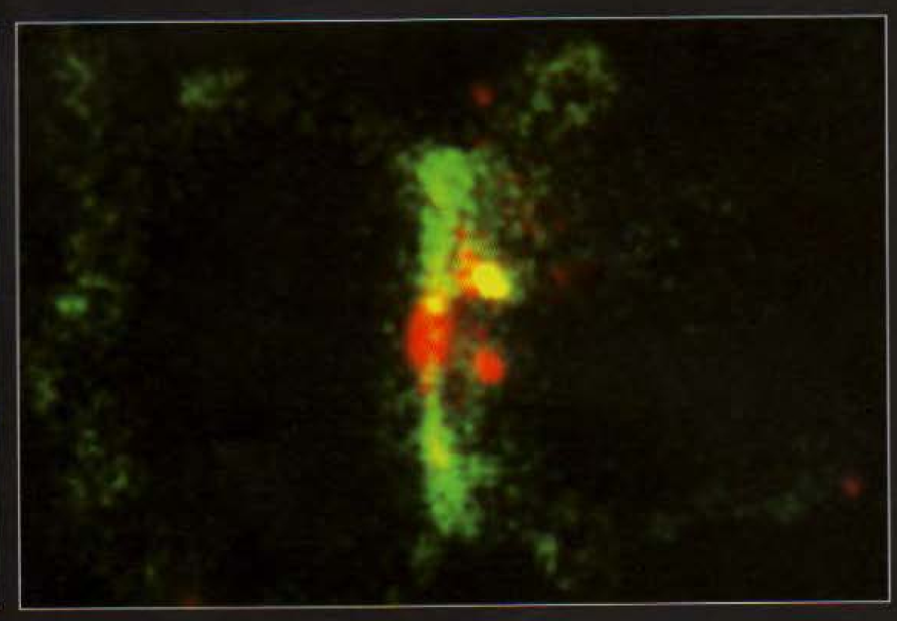
لقد كان هؤلاء الباحثون وغيرهم يستكشفون ما هو الدور الذي يمكن أن يؤديه البنيان المعماري للمشبك في تنظيم حجم الحوارات بين الخلايا التائية والخلايا العارضة للمستضد. فعن طريق جذب حالة وجود كمية صغيرة من المستضدات فإن الخلايا التائية يمكن أن تكدس مستقبلاتها في تقارب وثيق داخل المشبك كي تضخم الإشارة.

كانت مجموعتي البحثية تدرس ظواهر مماثلة في الخلايا القاتلة الطبيعية (بالفطرة) وهي نمط من الخلايا المناعية التي تبحث عن الخلايا التي أتلفتها مثلا طفرة سرطانية أو

(1) poisonous lytic proteins

(2) microtubules





أثناء انتقال فيروس يخصُّ ابيضاض الدم (اللوكيميا) الخلوي التائي (*باللون الأحمر*) من خلية تائية مصابة بالعدوى إلى خلية تائية غير مصابة (*في الأعلى، من اليسار إلى اليمين*). يُرى جزيء التالين اللاصق (*باللون الأخضر*) وهو يتركز حيث يلتقي الغشاءان الخلويان [*في الأعلى جهة اليسار*] في مشهد من داخل الخلية التائية المصابة بالعدوى. ويوحي هذا التركيب المشابه للمشبك المناعي بأن فيروس ابيضاض الدم الخلوي التائي البشري وغيره من الفيروسات التي تفترس الخلايا المناعية مثل فيروس العوز المناعي البشري (المسبب للإيدز)، يمكن أن تنتهز الفرصة وتستفيد من آليات الاتصال الخلوي للانتشار من خلية إلى أخرى.

الخلايا التي أصابها أحد الكائنات المسببة للمرض بعدوى ما وتدمرها. فهذه الخلايا المريضة يمكن أن تفقد خاصية إظهار بعض البروتينات على سطوحها ـ فتدرك الخلايا القاتلة الطبيعية المذكورة آنفا هذا النقصان في البروتينات وتعتبر ذلك علامة على المرض. وها نحن نتوصل حاليا إلى أن كمية هذه البروتينات الموجودة على الخلية المستهدفة تؤثر في نسق المشبك المناعي الذي تكونه الخلية القاتلة الطبيعية. والنسق المختلفة ترتبط فيما إذا كانت الخلية القاتلة الطبيعية ستقرر في النهاية قتل الخلية المستهدفة أو لا. وهكذا يمكن أن تثبت هذه النسق أو على الأقل تعكس المعلومات التي تستخدمها الخلية القاتلة الطبيعية لتحدد مدى اعتلال الخلية المستهدفة.

إلى جانب هذه الاكتشافات الحديثة الخاصة بالوظائف المحتملة للمشبك المناعي والتي تثير الاهتمام والفضول، كانت هناك أيضا بعض الأخبار المزعجة. فهناك ملاحظة حديثة جدا بينت أن هذا الرقص (الاهتزاز) الجزيئي[1] يمكن أن تستغله بعض الفيروسات، ومن ضمنها فيروس العوز المناعي البشري (المسبب للإيدز). فقد بيّن <Ch.> بانجام> [من كلية إمبريال بلندن] ومعاونوه أنه عند نقطة التماس بين الخلايا التي تجتازها الجسيمات الفيروسية تتجمع البروتينات في تركيب يشبه المشبك المناعي (*انظر الشكل في هذه الصفحة*). ومنذ ذلك الحين لاحظ العديد من الباحثين ظواهر مماثلة للمشبك الفيروسي، ومن ثم يبدو أن الفيروسات المعروفة بسطوها على الآلة الخلوية من أجل استنساخ مادتها الوراثية (الجينية) قد تكون قادرة كذلك على استخدام آليات الاتصال الخلوية لتدفع نفسها من خلية إلى أخرى.

لقد أطلق اكتشاف المشبك المناعي موجة من الأبحاث المبنية على أساس تصوير تفاعلات الخلايا المناعية والتي لاتزال تحتاج نتائجها إلى استكمال فهمها. ولكن هذا المجال الخصب بدأ بالفعل يطرح فرضيات جديدة ويولد مزيدا من الأبحاث لاختبار تلك الفرضيات. أما فكرة المشبك المناعي ذاتها فقد أعادت بالفعل تشكيل المفاهيم حول الجهاز المناعي كاشفة عن كونه شبكة معقدة لتبادل المعلومات تشبه إلى حد كبير الجهاز العصبي أكثر مما كان يُدرك من قبل.

إن مجرد استخدام مصطلح المشبك في وصف التفاعلات بين الخلايا المناعية قد شجع أيضا علماء الأعصاب والمتخصصين في علم المناعة على مقارنة ملاحظاتهم، فوجدوا أن نمطي المشبك العصبي والمشبك المناعي يستخدمان جزيئات بروتينية مشتركة. فعلى سبيل المثال، **الأجرين** agrin بروتين مهم يشترك في تجميع غيره من البروتينات عند المشبك بين العصبونات والعضلة. وقد أظهرت تجارب التصوير أن هذا الجزيء ذاته يتراكم أيضا عند المشابك المناعية ويستطيع أن يقوّي على الأقل بعض أنماط الاستجابات المناعية. وبالمثل تم اكتشاف أن المستقبلة التي تسمى «نيوروبيلين1» والمعروفة باشتراكها في إرسال الإشارات بين العصبونات موجودة أيضا عند المشابك المناعية. وتقترح التجارب أن «النيوروبيلين1» يساعد الخلايا المناعية على بحثها عن المرض بمعاونتها على تأسيس مشابك مناعية مع الخلايا الأخرى. ولكننا بحاجة إلى المزيد من الأبحاث لمعرفة الدور الصحيح الذي تؤديه المستقبلات في المناعة.

إضافة إلى ذلك، قامت مجموعتي البحثية باكتشاف تشابه آخر بين

(1) molecular dance

العصبونات والخلايا المناعية حينما لاحظنا أنابيب طويلة مكوَّنة من غشاء خلوي تتكون بسهولة وبسرعة بين الخلايا المناعية ومجموعة متنوعة من أنماط الخلايا الأخرى. وقد كان دافعنا لإجراء هذا البحث الذي أفضى إلى هذا الاكتشاف تقرير صدر عن باحثين ألمان ونرويجيين يصف ظاهرة مماثلة بين العصبونات (انظر الشكل في هذه الصفحة) صحيح أنه لا نحن ولا علماء الأعصاب نعرف وظيفة تلك الطرق السريعة الأنبوبية المتناهية الصغر، ولكن اكتشاف تلك الوظيفة يعتبر هدفا جديدا لعلم المناعة وعلم الأعصاب على حد سواء.





تربط أنابيب نانوية[٢] ـ مكوَّنة من الغشاء الخلوي ـ خليتين عصبيتين إحداهما بالأخرى (في اليمين) وخليتين مناعيتين إحداهما بالأخرى (في اليسار). ولاتزال هذه التراكيب المكتشفة حديثا غير مفهومة جيدا، ولكنها يمكن أن تؤلف آلية مبتكرة (غير مألوفة) للاتصال بين الخلايا عبر المسافات الطويلة. لقد شوهدت كل من الخلايا المناعية والخلايا العصبية وهي تتناقل البروتينات أو الكالسيوم فيما بينها عبر هذه الأنفاق المتناهية الصغر، كما شوهدت الفيروسات وهي تنتقل من خلية إلى أخرى داخل هذه الأنابيب أيضا.

وعلى سبيل المثال، يمكن أن تؤلف هذه الأنابيب الغشائية الدقيقة آلية لم تكن معروفة من قبل للاتصال بين الخلايا المناعية وذلك عن طريق السماح بإفراز موجَّه للسيتوكينات فيما بين الخلايا البعيد بعضها عن بعض. فقد وجد <S. واتكينز> و <R. سالتر> [من كلية الطب في جامعة بتسبرگ] أن مجموعة من الخلايا المناعية يمكنها أن تستخدم مثل تلك الطرق السريعة الأنبوبية الدقيقة لنقل إشارات الكالسيوم عبر مساحات شاسعة (بالمقياس الخلوي) تصل إلى مئات الميكرونات خلال ثوان.

وفي المستقبل قد يكشف إجراء المزيد من الدراسات عن التفاعل بين مجموعات أكبر من الخلايا المناعية عن نواح إضافية لشبكات الاتصال بين الخلايا المناعية. ويُعد تصوير التفاعلات بين الخلايا المناعية أثناء تجوالها داخل الأجسام الحية ـ وليس وهي على شريحة ـ مجالا مهما آخر لهذا الخط البحثي.

وفي تقرير حديث وصف <J. سولستون> [الحائز جائزة نوبل] استخدامه مجهر الحافة القاطعة[١] في السبعينات من القرن الماضي لفهم نمو الديدان قائلا: الآن، ولدهشتي، يمكنني أن أشاهد انقسام الخلايا. فصور <نورماسكي> للدودة هي من أجمل الأشياء التي يمكن تخيلها. وقد توصلت في إحدى عطلات نهاية الأسبوع إلى حل لغز الجزء الأعظم من نمو وتطور الحبل البطني[٣] بعد طور المضغة في الجنين عبر المشاهدة فحسب.

إن استخدام المجهر العالي الميز في مجال تفاعلات الخلايا المناعية لايزال مجالا فتيا جدا وفي جعبته بالتأكيد المزيد من المفاجآت. ومع أن جميع البروتينات السطحية المشتركة في قيام الخلايا المناعية بتعرّف المرض قد تمّ تعيين هويتها وتسميتها عمليا، فإن قدرة العلماء حاليا على مشاهدة هذه الجزيئات وهي تؤدي وظائفها في الزمان والمكان قد كشفت عن آلية المشبك المناعي وأعادت تأكيد قيمة «مجرد المشاهدة الفورية» باعتبارها طريقة علمية. ■

(١) cutting-edge microscopy (SMACs)

(٢) nanotuber: أنابيب دقيقة متناهية في الصغر (تقاس بالنانومتر ويساوي 10^{-9} من المتر)

(٣) ventral cord

(التحرير)

المؤلف

Daniel M. Davis

هو أستاذ في علم المناعة الجزيئية بكلية إمبريال في لندن. وقد تخصص في دراسة التفاعلات بين الخلايا المناعية باستخدام المجهر العالي الميز ولأنه بدأ مهنته العلمية فيزيائيا، فقد تحول إلى علم المناعة كزميل في معهد إيرفنجتون للأبحاث التالية للدكتوراه في قسم علم الأحياء (البيولوجيا) الجزيئية والخلوية بجامعة هارفرد. وقد قام هنالك في عام 1999 بتصوير أول صور لبنية المشبك المناعي في الخلايا القاتلة الطبيعية. وهي التي زودتنا أيضا بأول رؤية لتكون المشابك بين الخلايا الحية. ومنذ ذلك الحين قام «ديفيز» بتأليف ـ أو بالاشتراك في تأليف ـ أكثر من 50 ورقة علمية في الفيزياء التصويرية وعلم المناعة.

مراجع للاستزادة

Three-Dimensional Segregation of Supramolecular Activation Clusters in T Cells. C. R. Monks, B. A. Freiberg, H. Kupfer, N. Sciaky and A. Kupfer in *Nature*, Vol. 395, pages 82–86; September 3, 1998.

Neural and Immunological Synaptic Relations. Michael L. Dustin and David R. Colman in *Science*, Vol. 298, pages 785–789, October 25, 2002.

What Is the Importance of the Immunological Synapse? Daniel M. Davis and Michael L. Dustin in *Trends in Immunology*, Vol. 25, No. 6, pages 323–327; June 2004.

The Language of Life: How Cells Communicate in Health and Disease. Debra Niehoff. Joseph Henry Press, Washington, D.C., 2005. Available online at National Academies Press: www.nap.edu/books/0309089891/html

Scientific American, February 2006

هل الخلايا الجذعية المسبب الحقيقي للسرطان؟(*)

يتمثل الجانب المظلم للخلايا الجذعية ـ وهو إمكان تحولها إلى خلايا خبيثة ـ في كونها أصل عدد قليل من السرطانات، وربما السبب في سرطانات أخرى كثيرة. ويمكن أن يعتمد الشفاء من هذا المرض على تعقب هذه الخلايا المحيرة القاتلة وتدميرها.

<M. F. كلارك> ـ <M. W. بيكر>

بعد انقضاء أكثر من ثلاثين عاما على الحرب المعلنة ضد السرطان، يمكن الادعاء أن انتصارات قليلة مهمة قد تحققت، مثل معدل للبقيا قدره 85 في المئة لبعض سرطانات الطفولة التي كان تشخيصها يمثل في ما مضى حكما بالموت. كما أمكن لأدوية حديثة في حالات أخرى من السرطانات أن تعمل نوعا ما على إحصار المرض، لتجعل منه حالة يمكن للمريض أن يعيش بها. ففي عام 2001 مثلا، تمت المصادقة على العقّار كليفك Gleevec لمعالجة **ابيضاض الدم النقوي (النخاعي)(1) المزمن** chronic myelogenous leukemia (CML). ولاقى العقّار نجاحا باهرا، ذلك أن عددا كبيرا من المرضى هم حاليا في هدأة نتيجة المعالجة بالعقار كليفك. ولكن الأدلة توحي بقوة بأن هؤلاء المرضى لم يشفوا شفاء حقيقيا، ذلك أن مستودعا من الخلايا الخبيثة مسؤولا عن إبقاء المرض لم يُستأصل بعد.

ووفقا لمعرفة تقليدية شائعة، فقد ظل الاعتقاد سائدا لفترة طويلة أن بقاء أي خلية ورمية في الجسم قد يجعل احتمال الإصابة بالمرض قائما. لذا، فإن المعالجات الحالية تتركز على قتل أكبر عدد ممكن من الخلايا السرطانية. ولكن نجاحات هذه المقاربة لاتزال إلى حد كبير قيد الصواب والخطأ. كما يظل التكهن بالمرض ضعيفا لدى ذوي الحالات المتأخرة من الأورام الخبيثة الصلبة الأكثر شيوعا.

فضلا على ذلك، فلقد غدا واضحا حاليا أنه في السرطان CML (ابيضاض الدم النقوي المزمن) وأنواع قليلة أخرى من السرطانات هنالك نسبة في غاية الضآلة من الخلايا الورمية تمتلك القدرة على إنتاج نسيج سرطاني جديد. وأن استهداف هذه الخلايا النوعية بغية تدميرها قد يمثل الطريقة الأكثر نجاعة للتخلص من المرض. وبالنظر إلى أن هذه الخلايا تعمل كمحرك يستثير نمو خلايا سرطانية جديدة، ويحتمل كثيرا أنها تشكل أصل الخباثة نفسها، فلقد عُرفت بالخلايا الجذعية السرطانية ولكن يعتقد أيضا ـ بموضوعية تامة ـ أن هذه الخلايا أو ذريتها غير الناضجة والتي خضعت لتحول سرطاني، كانت في وقت ما خلايا جذعية سوية.

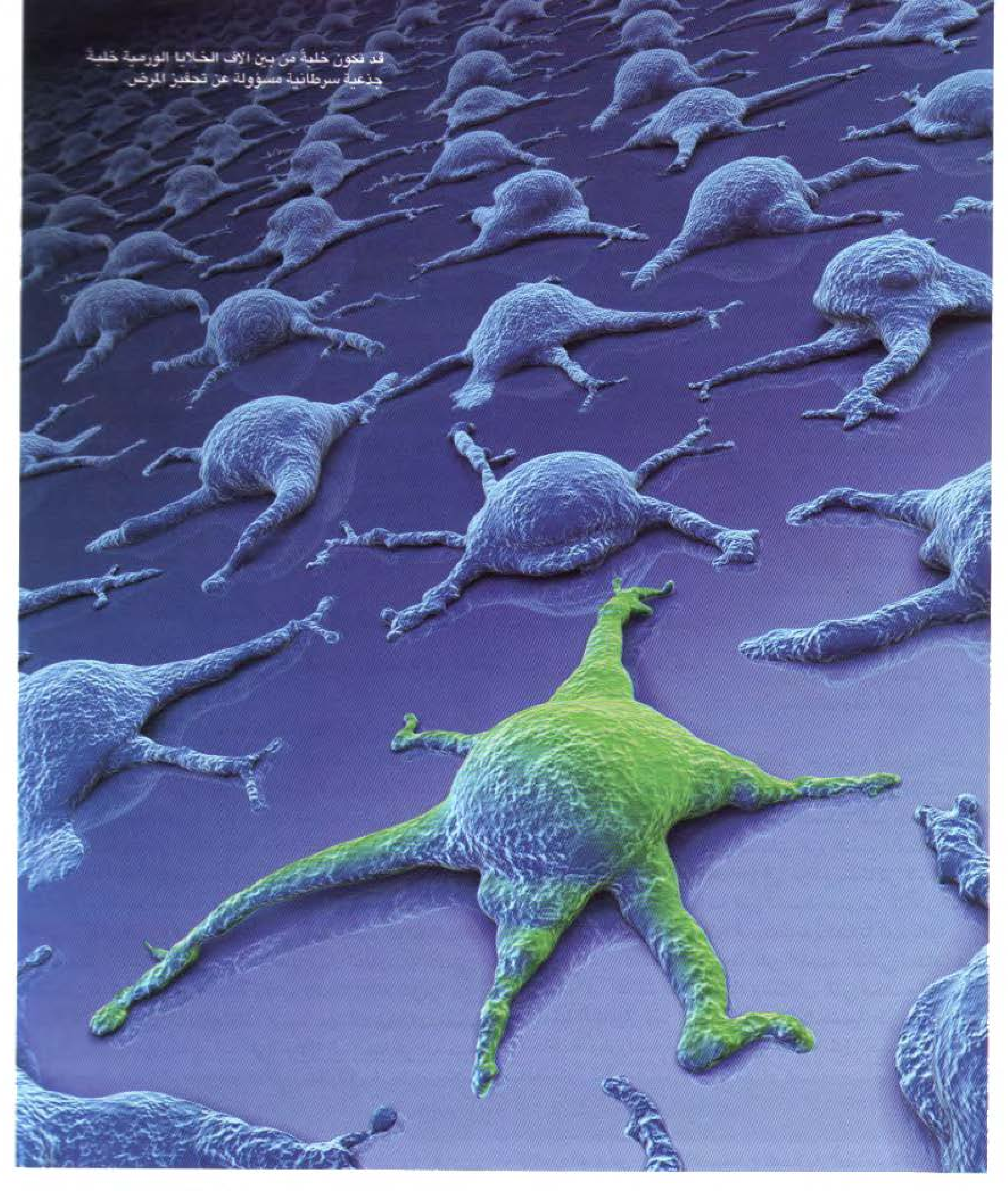
إن هذا التصور في أن تجمعا صغيرا من الخلايا الجذعية الخبيثة يستطيع أن يسبب السرطان ليس جديدا. ويُعتبر أن أبحاث الخلايا الجذعية قد بدأت فعليا في خمسينات وستينات القرن الماضي بدراسة الأورام الصلبة وسرطانات الدم. وتم الكشف عن عدد كبير من المبادئ الأساسية لتكوّن النسج السوية ولسيرورات التنامي بملاحظة ما يحدث عندما تخرج السيرورات السوية عن مسارها.

واليوم تُلقي دراسة الخلايا الجذعية الضوء على أبحاث السرطان. وفي السنوات الخمسين الفائتة زودنا العلماءُ بتفاصيل وافية عن الآليات الناظمة لسلوك الخلايا الجذعية السوية ولنتاجها الخلوي. وبدورها أدت هذه

(*) STEM CELLS: THE REAL CULPRITS IN CANCER?
(**) Overview/ Cancer Stem Cells
(1) myelogenous: ينشأ في نقي (نخاع) العظام. (التحرير)

نظرة إجمالية/ الخلايا الجذعية السرطانية(**)

- غالبا ما ينظر إلى الخلايا السرطانية على أن لجميعها الإمكانية نفسها لتتكاثر ولتنشر المرض. ولكن في أنماط كثيرة من السرطان يوجد فقط مجموعة ضئيلة من الخلايا الورمية تمتلك هذه المقدرة.
- تتقاسم الخلايا المولدة للورم مع الخلايا الجذعية سمات أساسية، بما في ذلك مدى عمر غير محدود وقدرتها على توليد طيف متنوع من أنماط خلوية أخرى. لذا فقد اعتُبرت هذه الخلايا المولدة للورم خلايا جذعية سرطانية.
- يعتقد أن هذه السليفات الخبيثة تنشأ نتيجة إخفاقات تنظيمية في الخلايا الجذعية التالفة أو لنسلها المباشر.
- ومن أجل استئصال شأفة المرض، فإن على معالجات السرطان أن تستهدف الخلايا الجذعية السرطانية.



قد تكون خلية من بين آلاف الخلايا الورمية خلية جذعية سرطانية مسؤولة عن تحفيز المرض.

التبصرات الجديدة إلى اكتشاف سلسلة مماثلة بين الخلايا السرطانية ضمن الورم نفسه، لتضيف سندا قويا للنظرية التي ترى أن الخلايا الشبيهة بالجذعية والتي ضلت طريقها تمثل الجذر الذي نشأت عنه سرطانات عديدة. لذا، فإن الاستهداف المجدي لهذه الخلايا الجذعية السرطانية بغية استئصال شأفتها يتطلب في المقام الأول فهما جيدا للكيفية التي تتحول فيها خلية جذعية سوية إلى ضارة.

سلوك منظم[*]

وكما هو معروف، فإن الجسم البشري يمثل -منظومة ذات أحياز غاية في التخصص[1]، تتألف من أعضاء ونسج متفردة، يؤدي كل منها وظيفة أساسية للحفاظ على الحياة. ولكن الخلايا الإفرادية التي تؤلف هذه النسج غالبا ما تتميز بقصر أجلها. فالجلد الذي

(*) Orderly Conduct

(1) highly compartmentalized system

يغطي جسدك اليوم هو ليس حقيقة الجلد نفسه الذي كان لديك قبل شهر من الزمن. ذلك أن خلايا سطحه قد انسلخت، وتم استبدالها كما أن بطانة المعي تُستبدل كل أسبوعين تقريبا. ويبلغ مدى عمر الصفيحات الدموية التي تساعد على تجلط الدم قرابة عشرة أيام.

إن الآلية التي تُبقي على مجموعة ثابتة من الخلايا العاملة في هذه النسج تكون متناغمة عبر الجسم كله، وهي في واقع الأمر مصانة في الأنواع المعقدة كافة. وتتمركز هذه الآلية في **جُميعة** pool صغيرة من الخلايا الجذعية المديدة العمر، تعمل مصانع للإمدادات الجديدة من الخلايا الوظيفية. وتتبع هذه السيرورة التصنيعية خطى على درجة عالية جدا من التنظيم والانتظام، بحيث يصبح وفقا لذلك كل جيل من ذراري(1) الخلايا الجذعية على درجة متزايدة من التخصص.

ولعل عائلة نقي (نخاع) العظم المكونة للدم وللخلايا المناعية تشكل خير مثال لهذه المنظومة. فجميع الخلايا الوظيفية الموجودة في الدم واللمف تنشأ عن خلية والدية عامة واحدة، تعرف **بالخلية الجذعية المكونة للدم** hematopoietic stem cell (HSC). تستوطن نقي العظم. وتمثل الخلية HSC في البالغ لا يزيد على 0.01 في المئة من مجموع خلايا نقي العظم. ومع ذلك، فإن كل خلية من هذه الخلايا النادرة تعطي عددا كبيرا جدا من **الخلايا السليفة** progenitor cells المتمايزة تمايزا وسطا (غير كاملة التمايز) وتنقسم هذه الخلايا بدورها، وتتمايز أكثر عبر عدة مراحل إلى خلايا ناضجة، مسؤولة عن إنجاز مهام نوعية: تراوح بين الدفاع ضد العدوى (الخمج) وبين نقل الأكسجين إلى النسج [*انظر الإطار في الصفحة المقابلة*]. وفي اللحظة التي تصل فيها الخلية هذه المرحلة النهائية الوظيفية، تكون قد فقدت كليا قدراتها على التكاثر أو على تغيير مصيرها وقدَرها، فيقال عنها عندئذ إنها صارت كاملة التمايز.

إن مقدرة الخلايا الجذعية على تجديد نفسها تضعها فعليا خارج قواعد اللعبة.

أمّا الخلايا الجذعية نفسها فتبقى، في غضون ذلك، غير متمايزة. حالة يتم الحفاظ عليها من خلال قابليتها المتفردة للتجدد الذاتي(2). فلكي تشرع في إنتاج نسج جديدة، تنقسم الخلية الجذعية إلى خليتين اثنتين، ولكن خلية واحدة من الخليتين الابنتين(3) الناتجتين قد تواصل، عبر مسلك خاص، باتجاه زيادة النوعية(4). أمّا الخلية الابنة الأخرى فقد تحتفظ، عوضا عن ذلك، بهويتها كخلية جذعية. وهكذا، فإن العدد المجمل للخلايا الجذعية في الجُميعة الواحدة يبقى ثابتا. في حين أن تكاثر الخلايا السليفة غير كاملة التمايز يتيح لتجمعات من أنماط نوعية من الخلايا المكونة للدم بأن تنتشر بسرعة كاستجابة للحاجات المتغيرة.

وتُعدُّ قابليةُ الخلايا الجذعية لإعادة تخليق نفسها بالتجدد الذاتي هي الخاصةَ المميزة الأكثر أهمية، وهي التي تمنح هذه الخلايا الكمون لمدى عمر ولتكاثر في المستقبل غير محدودين. وبالمقابل، فإن الخلايا السليفة تمتلك بعض المقدرة على تجديد نفسها أثناء تكاثرها، ولكنها مقيدة بآلية ضبط داخلية لعدد محدد تماما من الانقسامات الخلوية. ومع تزايد التمايز، فإن قدرة ذراري السليفات على التكاثر تتناقص تناقصا مطردا.

ويمكن ملاحظة الدلالة العملية لهذه الامتيازات عندما يتم اغتراس الخلايا الجذعية المكونة للدم أو الخلايا المتحدرة عنها. فعندما يتم تشعيع نقي عظم الفأر بغية تخريب الجهاز الطبيعي المكون للدم في الجسم، يمكن للخلايا السليفة التي تم اغتراسها في وسط النِّقي أن تتكاثر وتجدد تكوين الدم مؤقتا. ولكن بعد أربعة أسابيع إلى ثمانية، فإن تلك الخلايا ستموت. ومن جهة أخرى، فإن اغتراس خلية جذعية واحدة فقط مكونة للدم، يمكن أن يجدد كامل الجهاز الدموي للحيوان طوال مدة حياته.

لقد تم التوصل إلى فهم جيد لتعضي الجهاز المكوِّن للدم قبل أكثر من ثلاثين عاما؛ إلا أنه تم حديثا تعرُّف سلسلة خلوية مماثلة في نُسج بشرية أخرى، تشمل الدماغ والثدي وغدة البروستاتة (الموثة) والأمعاء الغليظة والدقيقة والجلد. كما أن مبادئ سلوك الخلايا الجذعية المنظمة تتشاركها أيضا هذه النسج، بما في ذلك آليات نوعية للتحكم في أعداد الخلايا الجذعية، ولتوجيه القرارات في ما يتعلق بمصير كل خلية من الخلايا. فمثلا، هنالك جينات عديدة وشلال من الأحداث(5) تستثير فاعلية هذه الخلايا ـ تعرف بالمسارات الجينية ـ تؤدي دورا حاسما في تقرير مصير الخلايا الجذعية ووظيفتها. وتوجد بين هذه المسارات الجينية سبل تأشير(6) تضبطها الجينات *Bmi-1* و *Notch* و *Sonic hedgehog* و *Wnt*. ومع ذلك، لم يتم تعرف أغلب هذه الجينات للمرة الأولى بوساطة علماء يدرسون الخلايا الجذعية، بل من قبل باحثي السرطان؛ ذلك أن مسارات هذه الجينات متورطة أيضا في تنامي السرطانات.

وبالفعل، فقد تمت ملاحظة الكثير من أوجه التشابه هذه بين الخلايا الجذعية والخلايا السرطانية. وينطوي التعريف الكلاسيكي للسرطان نفسه على القابلية الظاهرية للخلايا السرطانية لتعيش وتتكاثر إلى ما لانهاية، وقدرتها على غزو النسج المجاورة، وعلى الهجرة (**الانتقال** metastasization) إلى مواقع بعيدة في الجسم. وفي الواقع، إن التقييدات المألوفة التي تضبط بصرامة التكاثر الخلوي وهوية الخلايا السوية يبدو أنها قد رُفعت عن الخلايا السرطانية.

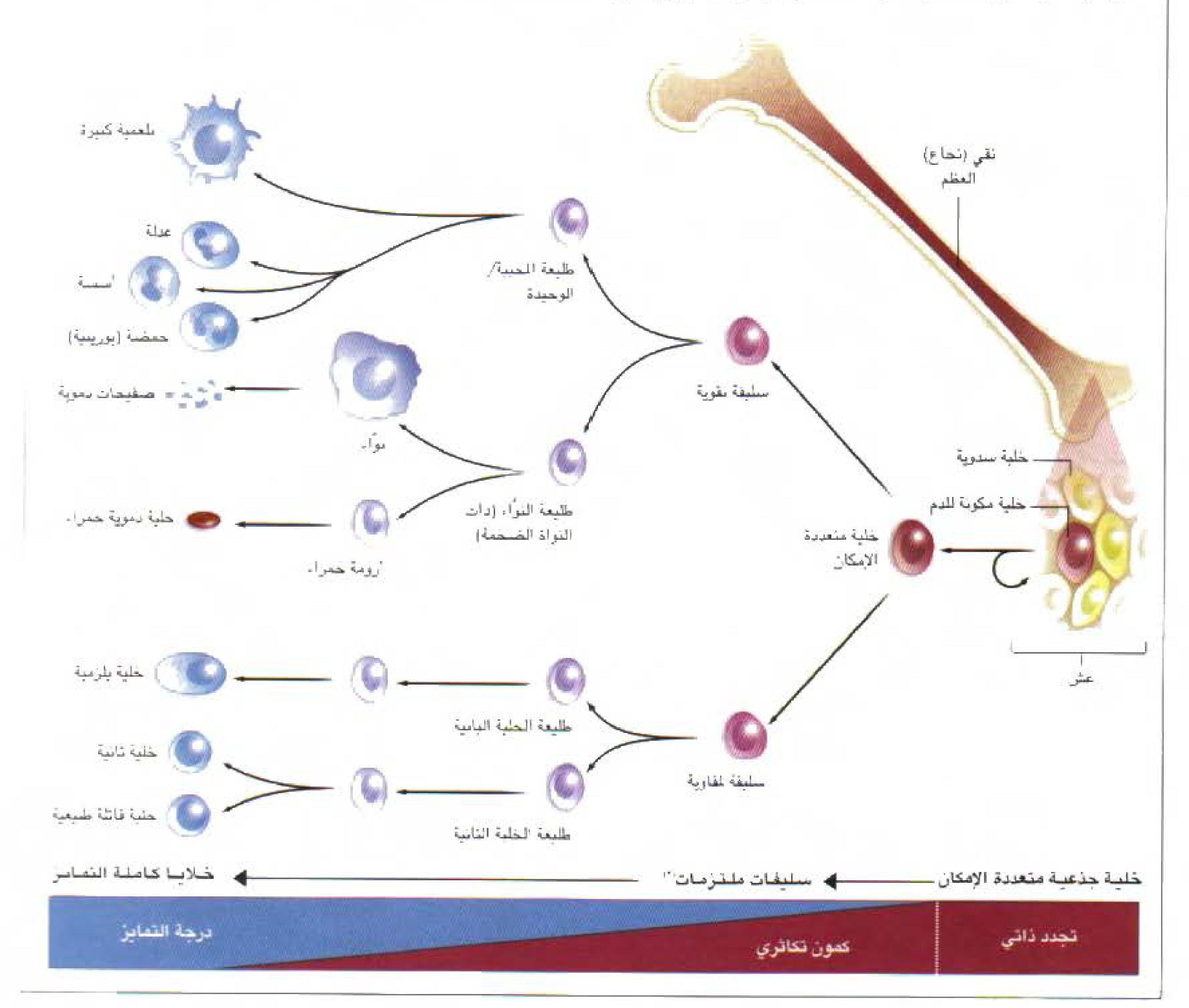
إن مقدرة الخلايا الجذعية على التجدد الذاتي أعفاها فعلا من القواعد المقيدة لمدى الحياة وللتكاثر، التي يخضع لها معظم الأنماط الخلوية. كما أن قدرة الخلايا الجذعية على التمايز إلى أنماط خلوية واسعة الطيف أتاح لها تشكيل جميع العناصر المختلفة اللازمة لتكوين عضو أو نسيج. وبالمماثلة، تتجسد السمة المميزة للأورام بتغاير الأنماط الخلوية التي تحويها هذه الأورام، وكأن الورم هو نسخة محورة مغرقة في الفوضى لكامل العضو. ولقد اتضح أن الخلايا الجذعية المكونة للدم تهاجر إلى أقسام بعيدة في الجسم استجابة لإشارات الأذى، تماما كما تهاجر الخلايا السرطانية.

أمّا في الخلايا الجذعية السوية، فإن التنظيم الجيني الصارم يجعلها تحت السيطرة من النمو والتنوع غير المحدودين. إن إزالة آليات السيطرة تلك سينجم عنها ما يماثل كثيرا السرطان. وتوحي هذه الفواسم المشتركة، جنبا إلى جنب مع أدلة تجريبية متنامية، أن

(1) جمع ذُرية.
(2) self-renewal
(3) daughter
(4) specificity
(5) cascades of events
(6) signaling pathways

الهرمية في الخلايا المكونة للدم(*)

توضح الخلايا الجذعية في **جهاز تكوين الدم** hematopoietic system المبادئ التي تحكم أيضا فاعلية الخلايا الجذعية في نسج أخرى. وتشكل مجموعة صغيرة من **الخلايا الجذعية المكونة للدم** hematopoietic stem cells (HSC) في نقي (نخاع) العظم مصدر معظم الأنماط الخلوية المختلفة: الدموية منها والمناعية، التي تجول في الجسم البشري. وتستوطن الخلايا HSC في عش بيئي(1) خاص، محاط بخلايا من نسيج صام تعرف **بالخلايا السدوية (اللحمة)** stromal cells. تزود الخلايا الجذعية بإشارات تنظيمية مهمة. فعندما تدعو الحاجة إلى خلايا دموية أو مناعية جديدة، تنقسم الخلية HSC لتنتج خلية ابنة تبقى في العش محتفظة بهويتها المديدة العمر، وخلية ابنة أخرى قصيرة العمر تعرف **بالخلية السليفة المتعددة الإمكان (القوي)** multipotent progenitor cell (MPP). وبدورها تنقسم الخلية MPP لتنتج سليفات تلتزم بتوليد خلايا في السُلالات النقوية (الدموية) أو اللمفاوية (المناعية). وما إن يتزايد تخصص الخلايا المتحدرة من السليفات، حتى تعاني انخفاضا مبرمجا في قدرتها على التكاثر حتى تتوقف عن الانقسام. فيقال عنها إنها في حالة تمايز نهائي. والخلايا الجذعية هي الوحيدة التي تحتفظ بكمون تكاثري غير محدود(2) عبر قدرتها على تجديد نفسها تجديدا لانهائيا بأن تنقسم من دون أن تتمايز.



إخفاق تنظيم الخلايا الجذعية يمثل الكيفية التي تبدأ وفقا لها أنماط خلوية عديدة بالتسرطن، وكيف تُخلّد هذه السرطانات نفسها، وكيف يمكن احتماليا للسرطانات أن تنتشر.

موطن الضُّعف(**)

إن وجود الخلايا الجذعية في نسج معينة، وبخاصة تلك التي يكون معدل التحول الخلوي (الانقسام الخلوي) فيها عاليا كالمعى والجلد يبدو وكأنه منظومة شديدة التعقيد وغير كفؤة لتحل محل الخلايا التالفة أو الهرمة. أو لا يبدو أنه سيكون معقولا أكثر في ما يتعلق بالكائن الحي إذا أمكن لكل خلية من خلاياه أن تتكاثر ببساطة، وكلما دعت الحاجة إلى ذلك، لتقدم خلايا بديلة عوضا عن الخلايا المتأذية المجاورة لها؟ للوهلة الأولى، قد يبدو ذلك ممكنا ولكن هذا سيجعل من كل خلية في الجسم خلية سرطانية كامنة

(*) Hierarchy in Blood Forming Cells
(1) environmental niche
(2) committed progenitors
(**) Achilles' Heel أو: لمقتل
(2) unlimited proliferative potential

ويُعتقد أن السرطانات تنشأ عندما تتراكم تغيرات «جينية ورمية» oncogenic، تتناول جينات أساسية داخل الخلية، وتؤدي إلى نمو وتحول شاذين لتلك الخلية. وتحدث الطفرات الجينية نمطيا عبر أذى مباشر، كتعرض الخلية للإشعاع أو للكيماويات، أو ببساطة عبر أخطاء عشوائية عندما يتم نسخ الجينة نسخا خاطئا قبل حدوث الانقسام الخلوي. وبالنظر إلى أن الخلايا الجذعية النادرة هي الخلايا الوحيدة المعمرة في الأعضاء حيث تتنامى معظم السرطانات، فهي تمثل مستودعا كمونيا أصغر بكثير من أن يتراكم فيه التالف الجيني الذي قد يؤدي في النهاية إلى السرطان. ولكن مما يؤسف له أنه بسبب كون الخلايا الجذعية معمرة، فإنها تصبح أيضا المخزن الأكثر احتمالا لمثل هذا التلف.

وبالفعل، فإن طول عمر الخلايا الجذعية نفسه قد يفسر لماذا يتنامى الكثير من السرطانات بعد عقود من تعرض النسيج للتشعيع. وقد لا تكون الأذية البدنية سوى الأولى في سلسلة من الطفرات الضرورية لتحول خلية سوية إلى خلية خبيثة. وإضافة إلى تكديسها واحتفاظها بهذه الندب الجينية الورمية، فإن القدرة التكاثرية المذهلة للخلايا الجذعية تجعلها هدفا مثاليا للحباثة (للسرطان). وبالنظر إلى أن التجدد الذاتي للخلايا يكون منظما تنظيما صارما، فإن مجموعة خلوية تمتلك تلك القابلية ستحتاج لكي تصبح سرطانية إلى طفرات إضافية أقل مما تحتاج إليه الخلايا التي لا تمتلك تلك القابلية.

إن مسارات ممكنة عديدة للسرطان ستصبح جلية.

وإذا ما أخذنا هذه الاعتبارات في الحسبان، فستصبح مسارات ممكنة كثيرة للسرطان جلية. ففي أحد الطرز، تحدث الطفرات في الخلايا الجذعية نفسها، مما يتسبب في فقدها السيطرة على قرارات التجدد الذاتي منتجة جُميعة من الخلايا الجذعية مؤهلة للإصابة بالسرطان. إن أحداثا جينية ورمية إضافية تالية تحفز تكاثر الخلايا الخبيثة (السرطانية) داخل ورم ما، قد تقع في الخلايا الجذعية أو في الخلايا المتحدرة منها؛ أي في المجموعة الخلوية السليفة المتورطة. ويُعتقد في طراز ثانٍ أن الطفرات الجينية الورمية تحدث في البدء في الخلايا الجذعية، لكن الخطوات النهائية في التحول إلى خلايا سرطانية تحدث فقط في الخلايا السليفة المتورطة. وسيتطلب هذا السيناريو أن يعاد بطريقة ما تفعيل القدرة على التجدد الذاتي التي فقدتها السليفات.

وتدعم الأدلة الحالية كلا الطرازين إنما في سرطانات مختلفة. ويوجد مثال واحد على الأقل لكلتا السيرورتين اللتين تؤديان دورا معينا في مراحل مختلفة للمرض نفسه. فابيضاض الدم النقوي المزمن (CML) هو سرطان الخلايا الدموية البيض، وينجم عن اندماج خاطئ لجينتين اثنتين. إن غرز الجينة المندمجة الناتجة سيحول خلية جذعية مكونة للدم سوية إلى خلية جذعية لابيضاض (السرطان) الدم. إن مرض CML الذي تُرك من دون معالجة يتطور إلى شكل حاد يعرف **بنُحران**(1) **(عصف) ابيضاض الدم النقوي المزمن** CML blast crisis. إن الأحداث الجينية الإضافية النوعية المسؤولة عن هذا الشكل المحوَّر الأكثر ضراوة للمرض قد منحت خلايا سليفة معينة القدرة على التجدد الذاتي.

مسعى مطرد(*)

خلال العقد الماضي، رسَّخ دليلٌ على أنه يمكن للخلايا الجذعية أن تصبح خبيثة، وإن خلايا سرطانية معينة فقط تتقاسم تنوعا من السمات مع الخلايا الجذعية: رسخ الفكرة أن الباعث الأساسي لنمو الورم قد يكون مجموعة صغيرة من الخلايا السرطانية الشبيهة بالجذعية. ومع أن لهذه النظرية تاريخا طويلا، فإن التَّقانة لم تكن متوافرة في الماضي للبرهان عليها.

وفي ستينات القرن الماضي بدأت فعلا قلة من العلماء بملاحظة أن مجموعات من الخلايا داخل الورم نفسه قد اختلفت في قدرتها على إنتاج نسيج ورمي جديد. وفي عام 1971، برهن <C. H. بارك> وزملاؤه [في جامعة تورنتو] على أن الخلايا في مزرعة خلوية مصدرها ورم نقوي أصلي أو أولي (سرطان يصيب **خلايا بلازمية** plasma cells في نقي العظم) أبدت اختلافات ذات دلالة في قدرتها على التكاثر. ولم يكن بإمكان مجموعة <بارك> إيجاد تفسير قاطع لهذه الظاهرة، ذلك أن تعليلين ممكنين على الأقل كانا قد اقترحا حينئذ: قد تكون الخلايا جميعها قد امتلكت القدرة على التضاعف في الزرع، ولكن بالمصادفة بعضها فقط تضاعف، أو أن تسلسلا خلويا يوجد في الورم، وأن الخلايا الجذعية السرطانية ستعطي خلايا غير مكونة للورم أو غير قادرة على التكاثر.

وفي عام 1967، برهن فعلا <P. J. فيالكو> [من جامعة واشنطن] على أن طراز الخلايا الجذعية هو احتماليا الطراز الصحيح لابيضاض الدم. فباستعماله بروتينا واسما على غشاء الخلية، يعرف بالرمز G-6-PD، يمكنه تعرف السُّلالة الخلوية، برهن <فيالكو> على أنه في بعض المصابات بابيضاض الدم نشأت الخلايا المكونة للورم وأيضا سليفاتها غير المكونة للورم والأكثر تمايزا كليهما من الخلية الوالدية نفسها.

وكانت هذه الدراسات المبكرة حاسمة في تطوير نموذج الخلايا الجذعية للسرطان. ولكنها ظلت مقيدة بعدم قدرة الباحثين على عزل الجمهرات الخلوية المختلفة الموجودة داخل ورم وفحصها. ولذا، فإن الحدث الرئيسي في بيولوجيا الخلايا الجذعية كان في المُتاحية (المستفادية) التجارية، بدءا من سبعينات القرن الماضي، لجهاز يعرف **بمقياس الجريان الخلوي** flow cytometer، الذي يستطيع آليا أن يفرز الجمهرات الخلوية الحية المختلفة بناء على الواسمات السطحية المتفردة التي تحملها.

وتمثل الحدث الحاسم الثاني حول تطور دراسات الخلايا الجذعية السرطانية في تطوير اختبارات حاسمة للتجدد الذاتي في تسعينات القرن الماضي. ولم تتوافر المقايسات(2) التي تؤكد التجدد الذاتي في الخلايا البشرية إلا عندما طور كل من <وايزمان> [من جامعة ستانفورد] و<E. J. ديك> [من جامعة تورنتو] طرائق أتاحت للخلايا الجذعية البشرية السوية أن تنمو في الفئران. فباستعمال مقياس الجريان الخلوي(3) ونموذج الفأر الجديد هذا، شرع <ديك> في عام 1994 في نشر سلسلة من التقارير التي أثرت في تطور هذا

(*) Steady Pursuit

(1) هو التغير الذي يحدث دفعة في الأمراض الحادة.

(2) assays

(3) flow cytometry

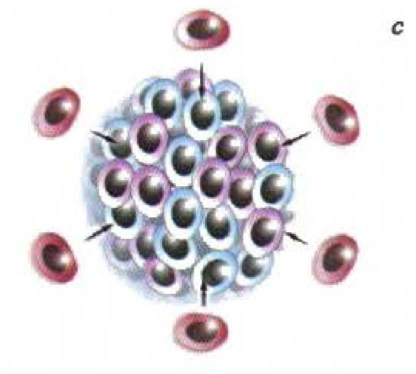
مسارات ممكنة للسرطان(*)

لقد تم التثبت من وجود الخلايا الجذعية السرطانية التي تتسبب في نمو الورم في أنواع عديدة من سرطانات الدم وفي حفنة من الأنماط الورمية الصلبة. ولكن الكيفية التي تنشأ وفقا لها هذه الخلايا الجذعية الخبيثة مازالت غير مؤكدة. وكالخلية الجذعية السوية، فإن للخلية الجذعية السرطانية القدرة على التجدد الذاتي بالانقسام من دون أن تتمايز. ولذا فإنها تستطيع كمونيا أن تنشئ عددا غير محدود من الخلايا غير المتمايزة الشاذة التي تشكل معظم الورم. ولهذه الخلايا السليفة مدى عمري محدود، وليست بحد ذاتها مولدة للورم. أي إنها لا تولد خلايا سرطانية جديدة. ويُضبط سلوك الخلايا الجذعية السوية ضبطا صارما من قبل برنامجها الجيني بالتوافق مع إشارات تتلقاها من عشها البيئي. لذا، فإن التغيرات التي تطرأ على الطريقة التي تستجيب وفقا لها الخلايا الجذعية السرطانية، التي تحمل طفرات جينية مكونة للورم ـ لتأشير العش(1) ـ قد تؤدي دورا مهما في الانتقال النهائي للخباثة [d ،c ،b ،a]. أمَّا الخيار الآخر فيتمثل في أن الطفرات في الخلايا الجذعية قد تُستبقى في الخلايا غير الناضجة المتحدرة منها، أي الخلايا السليفة progenitor cells، التي تعاني في ما بعد طفرات إضافية تعيد تفعيل خاصية التجدد الذاتي التي تمتلكها في الحالة السوية الخلايا الجذعية فقط [d]. وقد لوحظت أدلة على هذه الإمكانات جميعها في أنواع مختلفة من السرطان.

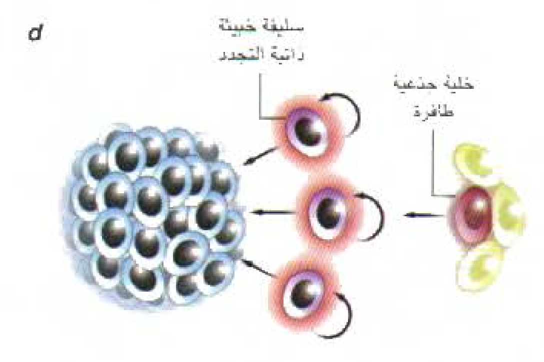


عش متسع. تُستبقى الخلايا الجذعية السرطانية ذات الطفرات الجينية الورمية في حالة مقيدة بوساطة إشارات عُشّية صحيحة حتى يتسبب تغير إضافي في الخلايا الجذعية السرطانية، أو في العش، في توسع هذا العش. ويتيح العش الأكبر للخلايا الجذعية الخبيثة أن تزيد مجموعاتها (جمهراتها) الخلوية الخاصة بها، ومن ثم زيادة عدد الخلايا الشاذة التي تولدها.

عش بديل. تتضمن الطفرات الجينية الورمية التي تصيب الخلايا الجذعية السرطانية تغييرات تمكنها من أن تتلاءم مع ظروف عش جديد. وباستطاعة الخلايا الجذعية السرطانية أن تزيد من انتشارها وتكاثرها، وربما تجتاح النسج المجاورة أو تنتقل إلى مواضع بعيدة في الجسم.



استقلالية العش. تجعل الطفرة الخلايا الجذعية التي هي مؤهبة فعلا للخباثة مستقلة عن تأشير العش، مما يزيل جميع أشكال التحكم البيني السوي الخاصة بالتجدد الذاتي والتكاثر في الخلايا الجذعية السرطانية.



طفرة التجدد الذاتي. إن الخلايا السليفة المؤهبة للخباثة، بوساطة طفرات جينية ورثت عن خلايا جذعية والدية، تعاني طفرة إضافية تعيد إليها قدرتها على التجدد الذاتي. وما إن يحدث ذلك، حتى تصبح هذه الخلايا ذات مدى عمري غير محدود. وتمتلك أيضا القدرة على تكوين الورم فتغدو خلايا جذعية سرطانية.

(*) Possible Paths to Cancer

(1) niche signaling: تأشير صادر عن العش. (التحرير)

تضييق الخناق على الخلايا الجذعية السرطانية(*)

لقد قادت تقنيات فرز الخلايا السرطانية الحية، وكذلك تقنيات تحديد فيما إذا كانت هذه الخلايا تمتلك القدرة على التجدد الذاتي، إلى التعرف الإيجابي للخلايا الجذعية السرطانية داخل مجموعات خلوية سرطانية كبيرة. وقد أوضحت أنماط السرطان المُجدولة في الأسفل أن الخلايا الجذعية الخبيثة لديها القدرة على التجدد الذاتي، وأنها تستطيع أن تنشئ المزيج الكامل لأنماط الخلايا التي كانت توجد في الورم الأصل. وتعني هاتان الخاصتان أن بإمكان عدد ضئيل من الخلايا الجذعية السرطانية أن تجدد الورم بكامله؛ وبإمكانها أيضا أن تستكمل باستمرار مجموعتها (جمهرتها) الخلوية الأكثر ضخامة - حيث يكون معظم الخلايا غير مكوّن للورم، وأن تعيد تشكيل السرطان الأصلي حتى لو تم تدمير معظم الورم أو كله. إن استئصال شأفة المرض سيتطلب إذًا معالجات تستهدف بنجاعة الخلايا الجذعية السرطانية

نمط السرطان (السنة التي تم فيها تعرف الخلايا الجذعية السرطانية)
ابيضاض الدم النقوي المنشأ الحاد (1994)
ابيضاض الدم بأرومة اللمفاوية الحاد (1997)
ابيضاض الدم النقوي المزمن (1999)
الثدي (2003)
الورم النقوي المتعدد (2003)
الدماغ (2004)
البروستاتة (الموثة) (2005)

المجال في المستقبل، أوضح من خلالها كيف تعرّف خلايا جذعية سرطانية في ابيضاض الدم. وفي عام 2003 تعرّف <R. جونز> [في جامعة جونز هوپكينز] مجموعة من الخلايا الجذعية السرطانية في **الورم النقوي (الميلوم) المتعدد** multiple myeloma.

وفي وقت مبكر من العام نفسه (2003)، نشرت مجموعتنا [من جامعة ميتشگان في آن أربر] الدليل الأول على وجود الخلايا الجذعية السرطانية في الأورام الصلبة. فباغتراس مجموعات خلوية من أورام الثدي البشرية في الفئران، كان باستطاعتنا أن نؤكد أنه ليس لجميع خلايا سرطان الثدي البشرية القدرة نفسها على توليد نسيج ورمي جديد. كانت هنالك مجموعة صغيرة واحدة فقط من الخلايا قادرة على إعادة تخليق الورم الأصل في البيئة الجديدة. عندئذ قارنّا الطرز المظهرية، أو السمات الفيزيائية، لتلك الأورام الجديدة من عينات المرضى، فوجدنا أن سمات الأورام الجديدة تستعيد سمات الأصل. وتدل هذه النتيجة على استطاعة الخلايا المكونة للورم المغترسة أن تجدد نفسها وأن تنشئ أيضا جميع المجموعات الخلوية المكونة للورم المختلفة الموجودة في الورم الأصل، بما في ذلك الخلايا غير المكونة للورم.

لقد وثقت دراستنا صحة وجود هرمية خلوية (سلسلة من الخلايا) داخل سرطان الثدي تماثل تلك التي تم تعرفها في سرطانات الدم. ومنذ ذلك الحين، شهدت أبحاث بيولوجيا الخلايا الجذعية السرطانية توسعا هائلا، حيث تستمر المختبرات عبر العالم في العثور على مجموعات خلوية صغيرة مماثلة مكونة للورم في أشكال أخرى من السرطان. فمثلا في عام 2004، تعرف مختبر <P. ديركس> [من جامعة تورنتو] خلايا من أورام أولية في الجهاز العصبي المركزي للإنسان تمتلك القدرة على تجديد كامل الورم في الفئران. إضافة إلى ذلك، وجد هذا الباحث عددا كبيرا من الخلايا الجذعية السرطانية في واحد من أسرع أشكال سرطان الدماغ البشري نموا، ونعني بذلك **الورم الأرومي اللبي** medulloblastoma، وذلك إذا ما قورن بخلايا مكونة للورم أقل عددا بكثير، وتوجد في أنماط ورمية دماغية أقل ضراوة.

ويقدم أيضا حقل له صلة بأبحاث مكثفة حديثة دعما لطراز الخلايا الجذعية السرطانية. وتُظهر بيئة التأثير التي توجد بها الأورام أنها تؤثر بقوة في استهلال الخباثة وبقائها. وفعلا أثبتت الدراسات على خلايا الجسم السوية، وكذلك على الخلايا الجذعية، الدور الأساسي للإشارات الصادرة عن النسيج المحيط، وعن **المطرس**[1] **خارج الخلايا** extracellular matrix، في الإبقاء على هوية نمط خلوي معين وفي توجيه سلوكه. فمثلا، تميل الخلايا السوية التي أزيلت من بيئتها الطبيعية في الجسم إلى فقدان بعض خصائصها الوظيفية التمايزية. وبالمغايرة، فإنه يتعين زرع الخلايا الجذعية في وسط يزودها بإشارات تنبئها بالبقاء في حالة غير متمايزة، وإلاّ فإنها ستشرع بسرعة في التكاثر والتمايز في ما يبدو أنه تعبير عن فقدانها لسلوكها المبرمج. وإشارات العش (البيئة المحيطة) هي وحدها التي تبقيها مقيدة.

وتكون بيئة الخلايا الجذعية في الجسم (على شكل غير محدد) محاطة بأنماط خلوية نوعية كالخلايا السَّدَوية التي تكون النسيج الضام في نقي العظم. وبصرف النظر عن استثناءات قليلة، فإن الخلايا الجذعية تبقى دائما في العش وأحيانا تتصل فيزيائيا بها عن طريق جزيئات التصاق. ومن ناحية أخرى، تهاجر الخلايا السليفة مبتعدة عن العش، وغالبا ما تكون برفقة خلايا حارسة، حيث ستصبح أكثر تمايزا.

إن أهمية التأثير الصادر عن العش في الإبقاء على الخلايا الجذعية بحالة غير متمايزة، وفي الحفاظ عليها **هاجعة** quiescent حتى تتم دعوتها إلى إنتاج خلايا جديدة، توحي بأنه يمكن لهذه الإشارات البيئية الموضعية أن تمارس ضبطا تنظيميا مماثلا على الخلايا الجذعية السرطانية. فمثلا، أوضحت تجارب مثيرة للاهتمام أنه عند زرعها في بيئة جديدة فإن الخلايا الجذعية المؤهبة للخباثة (للسرطنة) بسبب الطفرات الورمية، تفشل رغم ذلك في إنتاج ورم. وعلى العكس من ذلك فإن الخلايا الجذعية السوية التي اغترست في بيئة نسيجية سبق أن تضررت بالتشعيع كانت باعثا على تكوين أورام.

إن كثيرا من المسارات الجينية ذاتها التي تم تعرفها بالتأثير بين الخلايا الجذعية وبين عشها قد ترافقت مع السرطان، مما يوحي أيضا بوجود دور للعش في التحول النهائي إلى الخباثة. فمثلا، إذا ما احتجزت الخلايا الجذعية الخبيثة مقيدة في العش، ولكن تم بطريقة ما تحوير هذا العش وتوسيعه، فستجد جميعة الخلايا الجذعية

(*) Cornering Cancer Stem Cells

(1) المطرس (الأمهة) خارج الخلايا: هو المادة بين الخلوية؛ أي التي تحيط بالخلايا في بعض النسج وتفرز هذه المادة الخلية نفسها - أو مجموعة الخلايا. والأمَّهة matrix نحت من الأم mater، وx تفيد تأكيد التأنيث. (التحرير)

إن تدمير المحرك الدافع للمرض يعني ترك الخلايا غير المكونة للورم تموت ذاتيا.

الخبيثة متسعا تنمو فيه. وهناك احتمال آخر في أن طفرات جينية ورمية معينة داخل الخلايا الجذعية السرطانية سمحت لهذه الخلايا بالتلاؤم مع عش مختلف، ومرة ثانية تتركها تزيد في أعدادها وتوسع حيز وجودها. ويبقى بديل ثالث يتمثل في احتمال أن تكون الطفرات قد سمحت للخلايا الجذعية السرطانية أن تصبح مستقلة كليا عن إشارات العش كافة، لاغية أشكال الضبط البيئي على كلٍّ من التجدد الذاتي والتكاثر.

تقارب الاتجاهات[2]

إن تضمينات طراز الخلايا الجذعية للسرطان في ما يتعلق بالطريقة التي نفهم بها ونعالج أيضا وفقا لها الخباثات جلية ودرامية. وتستهدف المعالجات الحالية أنواع الخلايا الورمية جميعها. ولكن دراستنا ودراسات أخرى أوضحت أن جزءا ضئيلا فقط من الخلايا السرطانية لديه القدرة على إعادة الإنشاء، وعلى دوام الخباثة. وإذا كانت المعالجات التقليدية تسبب انكماش الورم ولكنها تخطئ تلك الخلايا، فإن السرطان سيعود على الأرجح. أمّا المعالجات التي تستهدف نوعيا الخلايا السرطانية الجذعية فقد تدمر المحرك الدافع للمرض، تاركا أيا من الخلايا المتبقية غير المكونة للورم لتموت في النهاية موتا ذاتيا.

وفي الممارسة الطبية يوجد فعلا دليل ظرفي يدعم هذه المقاربة. فمثلا، بعد إجراء المعالجة الكيميائية لسرطان الخصية، يُفحص ورم المريض لتقييم تأثير المعالجة. فإذا ما احتوى الورم على خلايا ناضجة فقط، فإن السرطان عادة لا يعود، ولن تكون هنالك حاجة إلى معالجات إضافية. أمّا إذا كان هنالك عدد كبير من الخلايا التي تبدو غير ناضجة - أي إنها ليست متمايزة تماما - موجود في عينة الورم، فإن السرطان سيعود على الأرجح، وأن الإجرائية (البروتوكول) المعيارية تستدعي معالجة كيميائية إضافية. ولكننا مازلنا نفتقر إلى البرهان على أن هذه الخلايا غير الناضجة هي نسل حديث يدل على وجود خلايا جذعية سرطانية. ولكن ترافق هذه الخلايا مع التكهن بالمرض أمر واجب.

بيد أنه لا يمكن تعرف الخلايا الجذعية بناء على مظهرها فقط. لذا، فإن تطوير فهم أفضل للخصائص النوعية المتفردة للخلايا الجذعية السرطانية سيتطلب في المقام الأول تقنيات محسنة لعزل هذه الخلايا النادرة ودراستها. وما إن نفهم الخصائص المميزة لها، يمكننا استعمال هذه المعلومات لاستهداف الخلايا الجذعية السرطانية بمعالجات صُممت لها خصوصا. وإذا كان على العلماء مثلا أن يكتشفوا الطفرة أو العامل البيئي المسؤول عن منح القدرة على التجدد الذاتي لنمط خاص من الخلايا الجذعية السرطانية، فإن ذلك سيصبح هدفا واضحا لتجريد تلك الخلايا المكونة للورم من خباثتها.

وقد تم إيضاح هذه الاستراتيجية الواعدة بأمثلة مشجعة قدمها كل من <C. T> جوردان> و <M. L> گوزمان> [من جامعة روشستر]. ففي عام 2002، تعرف هذان الباحثان سمات جزيئية متفردة لخلايا جذعية سرطانية يُعتقد أنها تسبب **ابيضاض الدم النقوي الحاد** acute myeloid leukemia (AML)، وأوضحا أنه بالإمكان استهداف الخلايا الجذعية السرطانية استهدافا تفصيليا بعقاقير نوعية. وفي عام 2005، نشرا اكتشافهما مركبا مشتقا من نبات **الأقحوان** feverfew، يستحث الخلايا الجذعية المصابة بالابيضاض AML على الانتحار، في حين أنها لا تؤثر في الخلايا الجذعية السوية.

وتأمل بعض المجموعات البحثية في تدريب الخلايا المناعية لتتعرف الخلايا السرطانية وتسعى إليها. كما أن بعضها الآخر يستكشف استعمال العقاقير الموجودة لتحوير تأثير العش (البيئة) على أمل حرمان الخلايا الجذعية السرطانية من العوامل التي تساعدها على النماء. وإضافة إلى ذلك، هنالك فكرة هي حاليا قيد الاستقصاء، تتمثل في إمكان تطوير عقاقير لإجبار الخلايا الجذعية السرطانية على التمايز، وهذا يجردها من القدرة على التجدد الذاتي.

ويتمثل الأمر الأكثر أهمية في أن الباحثين في نطاق السرطان هم حاليا في عنق قارورة الارتياب. فبمقاربات تضامنية[1] غرضها استهداف مسارات جينية وحيدة في حفاظها على الخلايا الجذعية السرطانية، وفي تعطيلها للّغة المتبادلة بين الخلايا الورمية وبيئتها، نأمل أن نستطيع في القريب العاجل العثور على المتهم الحقيقي في السرطان وكبح نشاطه. ■

(١) combination

(٢) Closing in

المؤلفان

Michael F.Clarke - Micheal W. Becker

عملا معا في مختبر <كلارك> بجامعة ميتشيگان، حيث تم عام 2003 - أول مرة - عزل الخلايا الجذعية لورم الثدي. و<كلارك> هو حاليا مدير مساعد وكذلك أستاذ بيولوجيا السرطان والطب في معهد استانفورد للخلايا الجذعية والطب التجديدي (التخليقي). ويستمر في عمله على تعرف الخلايا الجذعية السرطانية وعلى الآليات التي تتجدد وفقا لها هذه الخلايا وكذلك الخلايا الجذعية السوية. وأما <بيكر> فهو أستاذ مساعد في قسم علم الدم وعلم الأورام في المركز الطبي التابع لجامعة روشستر. إن بؤرة أبحاث <بيكر> هي تعرف خصائص الخلايا الجذعية لابيضاض الدم. وتتركز أعماله السريرية (الإكلينيكية) على الدم السطحي (المحيطي) peripheral وعلى اغتراس نقي العظم.

مراجع للاستزادة

The Reversal of Tumor Growth. Armin C. Braun in *Scientific American*, Vol. 213, No. 5, pages 75-83; November 1965.

The Proteus Effect: Stem Cells and Their Promise for Medicine. Ann B. Parson. Joseph Henry Press, 2004.

Context, Tissue Plasticity, and Cancer: Are Tumor Stem Cells Also Regulated by the Microenvironment? Mina J. Bissell and Mark A. LaBarge in *Cancer Cell*, Vol. 7, pages 17-23; January 2005.

Leukaemia Stem Cells and the Evolution of Cancer-Stem-Cell Research. Brian J. P. Huntly and D. Gary Gilliland in *Nature Reviews Cancer*, Vol. 5, No. 4, pages 311-321, April 2005.

Stem Cells and Cancer: Two Faces of Eve. Michael F. Clarke and Margaret Fuller in *Cell*, Vol. 124, pages 1111-1115; March 24, 2006.

Scientific American, July 2006

خوض في الفضلات[*]

نتيجة للتنمية العمرانية غير المُدققة على طول السواحل الأمريكية، يتزايد تلوث الشواطئ ومهاد[1] المحار بالميكروبات المُمرضة[2].

<M. A.> مالين

طالما جذبت السواحلُ الأمريكية المتعرجة الرائعــة السكانَ في هذا البلد. ولعل أبلغ وصف لهـذه الجـاذبيـة التي لا تقـاوم هو وصف <H. ميلفيل> في مقدمة رواية «موبي ديك»: «لن يرضيـهم شيء إلا الوصـول إلى أقصى حدود الأرض... فلابد أن يقتربوا من المياه بقدر ما يمكنهم من دون أن يسقطوا فيها». وفي السنوات الأخيرة، انتقل ملايين الأمريكيين إلى المناطق الساحلية، وبخاصة في الجنوب الشرقي، للتمتع بمناخها المنعش وفـرص الترويح التي تتيحـها وجمـالهـا الطبيـعي. ومن المؤسف أن حـركة التنميـة العمرانية السريعة التي تفتقر إلى التخطيط الجيد تفسد هذا الجمال إلى حد كبير. لقد تسببت أحياء ميكروية[3] مُمرضة مصدرها فضلات الحيوانات والناس في تلوث أعداد متـزايدة من الشـواطئ ومـهاد المحـار على طول الساحل.

وطبقا لتقرير صدر حديثا عن مجلس الدفـاع عن الموارد الطبيـعـيـة، أصـدرت الولايات السـاحلية، في عـام 2004، أوامر بإغـلاق الشـواطئ وتحـذيرات من التلوث استمرت لمدة 19 950 يوما وأثرت في 1234 من شـواطئ المحيطات والمياه العذبة، أو نحو ثلث العدد الإجمالي للشواطئ التي يرصدها موظفو الصحة بصورة منتظمة. وقد ارتفع العـدد الكلي للأيام التي صـدرت بشـأنهـا إجراءات تنظيمية للشواطئ بنسبة 9 في المئة عما كان عليه في عام 2003 (الذي كان بدوره أعلى بنسبة 50 في المئة من العدد الإجمالي في عـام 2002، مع أن هذه الزيادة الكبـيـرة كانت ترجع في جانب منها إلى تغيير قواعد الرصد الفدرالية). وكان السبب في إصدار 85 في المئة من أوامر الإغلاق والتحـذيرات من التلوث هو اكـتـشـاف أعـداد زائدة من بكتيرات[4] البراز في مياه الشواطئ.

وعند انتقالها في اتجاه أدنى المجرى مع فضـلات الحيوانات في مياه سيل من الأمطار الغـزيرة الجـارية فـوق سطح الأرض أو مع فـضـلات الإنسـان في طفح المجـاري والمواد المتسربة من خزانات التعفين، فإن الميكروبات المحـمـولة بالمياه قـد تسبب أمـراض الكبـد وعـداوى (أخـمـاج) الجـهـاز التنفـسي والاضطرابات المعدية المعوية التي قـد تؤدي إلى الوفـاة. وتشيع هذه الأمراض في بلدان العالم الثالث بسبب سوء الصرف الصحي. أمـا في الولايات المتحـدة فتنشـأ المشكلة عن التنميـة العـمـرانيـة التي تفتـقـر إلى الحكمة وليس عن الفقـر. فإنشـاء العديد من البيوت والطرق ومراكز التسوق ومواقف السيارات أضـر بنظم الصـرف الطبـيـعـيـة في المناطق السـاحلية، كما أن الفضـلات التي كانت تقوم بتنقـيـتـهـا في الماضـي الغـابات أو الأراضـي الرطبة[5] صـارت حـاليا تلوث مراسـي السـفن والشواطئ بشكل منتظم.

كـيـف يتـسـنى للولايات والمجـتـمـعـات السـاحلية إذًا أن تحد من التلوث الميكروبي؟ لقـد أدت هذه المسـألة إلى صـراعـات بين شركات المقاولات والسياسيين من أنصـار التنمـيـة من جـهـة، والسلطات التنظيـمـيـة وصـائدي المحـار للأغـراض التـجـاريـة والترويحية وهواة ركوب الأمواج والسباحة والغوص وأنصار الحفاظ على البيئة من جهة أخرى. ومن حسن الحظ، أنه تتوافر بعض الحلول المبتكرة لهـذه المشكلة؛ إذ يمكن من خلال استراتيجيات «التنمية الذكية» إعادة تأهيل الشـواطئ الملوثة مع تحـقـيق فـوائد اقـتـصـادية في الوقت نفسه. ونظرا إلى أن الإغلاق المتكرر للشواطئ يمكن أن يقلص من حركة السياحة ويؤدي إلى انخفاض أسعار العقارات، فإن تطبيق ضوابط معقولة للتنمية العمرانية للمناطق الساحلية يمكن أن يعزز اقتصاد المناطق الساحلية وأن يحقق بنفس القدر الحماية للصحة العامة.

(*) WADING IN WASTE

(**) Overview/ Microbial Pollution

(1) beds: ج: مهد، مكان النمو.

(2) المسببة للأمراض.

(3) microorganisms أو مجهرية.

(4) جمع بكتيرة.

(5) wetslands

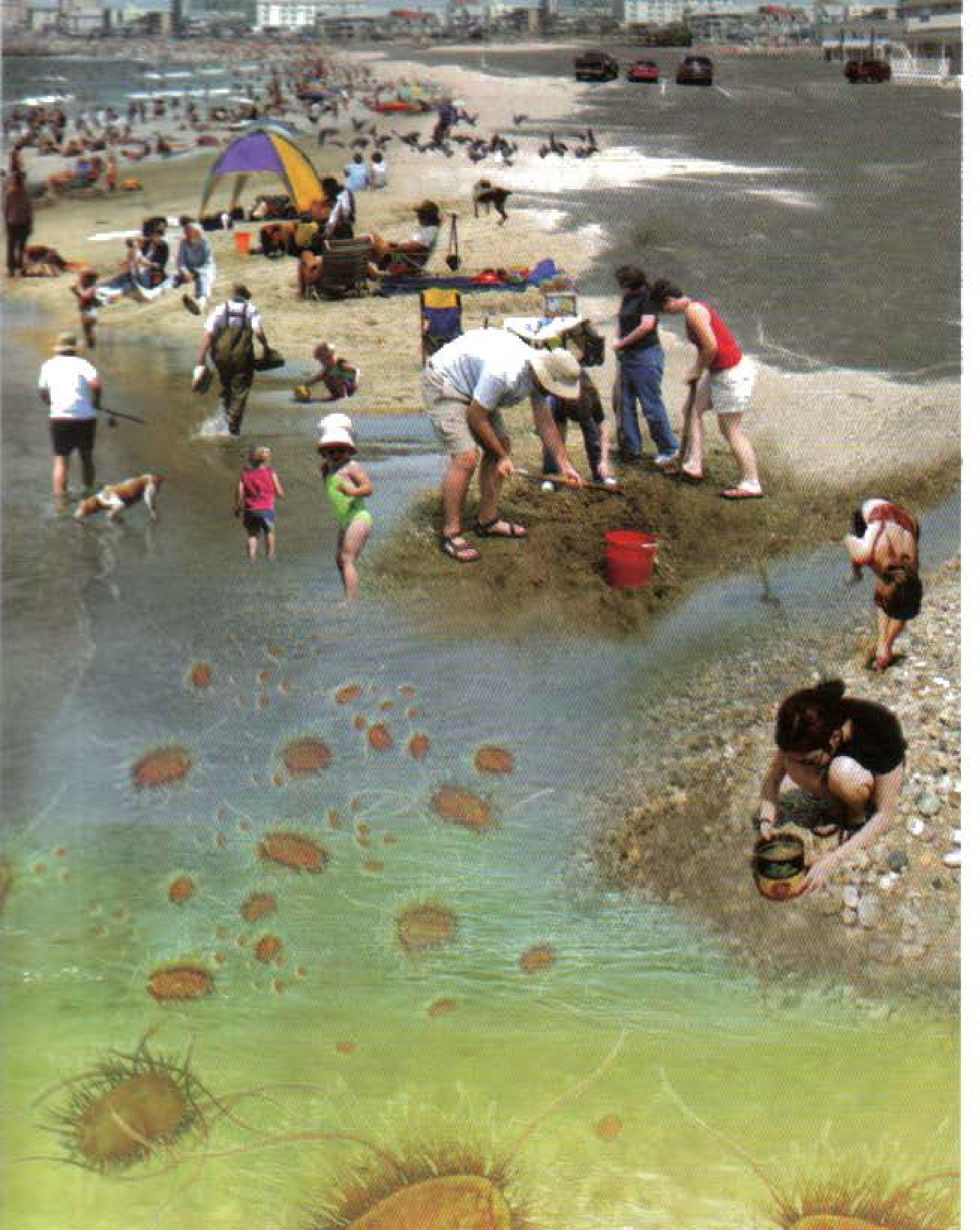
(6) impervious: لا ينفذ منها الماء.

(7) tidal creeks: ج: خور، أو خليج صغير.

(8) septic tanks

نظرة إجمالية/ التلوث الميكروبي[**]

- بسبب ازدهار حركة التنمية العمرانية في المناطق الساحلية بالولايات المتحدة، صار جزء كبير من المنطقة القريبة من الساحل مغطى بسطوح كتيمة[6]، كمواقف السيارات والطرق والأرصفة. وعندما تسقط الأمطار فإنه يمكن لمياه السيول المتدفقة فوق هذه السطوح أن تحمل معها براز الحيوانات والميكروبات المصاحبة له إلى قنوات الصرف التي تؤدي مباشرة إلى البحيرات والأنهار والشواطئ.
- التلوث ببكتيرات البراز هو السبب الرئيسي في إغلاق الشواطئ وإصدار التحذيرات التي تؤثر حاليا في ثلث مجمل شواطئ البلد التي يتم رصدها. كما تهاجم الميكروبات الخطرة بصورة وبائية مراسي السفن والخيران المدية[7] ومهاد المحار.
- لمكافحة التلوث الميكروبي، تستطيع المجتمعات الساحلية تشجيع الحفاظ على المساحات الخضراء، وتركيب المرشحات في مصارف مياه الأمطار، وحظر إنشاء خزانات التعفين[8] في المناطق ذات التربة المسامية.



تتعرض صحة رواد الشواطئ وصائدي المحار في الولايات المتحدة للخطر من بكتيريات البراز[1] مصدرها فضلات الإنسان والحيوان، إذ تنتقل الميكروبات الممرضة، مثل الإشريكية القولونية، من مناطق التوسع العمراني التجارية والسكنية إلى المياه الساحلية بوساطة مياه الأمطار الجارية القادمة من تلك المناطق وعن طريق التسرب من نظم خزانات التعفين المبنية في أمكنة غير ملائمة

ازدهار السواحل[*]

ذكرت الإدارة الوطنية لشؤون المحيطات والغلاف الجوي في تقريرها عن الاتجاهات الساحلية[2] في عام 2004، أن 153 مليون أمريكي - أو 53 في المئة من سكان البلد - يعيشون في المقاطعات التي تحدها سواحل المحيط والبحيرات العظمى والتي تشكل 17 في المئة فقط من مساحة الأراضي القارية في الولايات المتحدة [*انظر الإطار في الصفحة 33*]. والأدهى من ذلك أن هناك سبعة ملايين شخص آخرين يتوقع انضمامهم إلى سكان السواحل بحلول عام 2008، ويزداد العدد الإجمالي موسميا بسبب الأعداد الهائلة من المصطافين. لقد تحولت مساحات شاسعة كانت في الماضي غابات أو مزارع إلى منتجعات وتقسيمات من الأراضي المخصصة للأغراض السكنية ومحلات تجارية ومطاعم ومجمعات إدارية وأراضٍ للأغراض الصناعية ممتدة على طول الشاطئ. وفي غمار ذلك، تقوم شركات الإنشاء بتجفيف الأراضي الرطبة وتغطية أراضي، كانت تكسوها الخضرة في الماضي، بالأسفلت والخرسانة والمواد المستخدمة في بناء المساكن.

والمنظر الطبيعي الناتج من ذلك تغلب عليه السطوح الكتيمة كمواقف السيارات والطرق والأرصفة وأسقف المباني ومواقع الإنشاء المكدسة بالمعدات الثقيلة التي لا تسمح بتخلل المياه فيها. وعند هطول الأمطار، تتدفق مياه السيل من تلك الأمطار فوق هذه السطوح وتجرف في طريقها روث الحيوانات والملوثات الأخرى ليلقى بها في مجاري الصرف أو مصارف مياه الأمطار، التي يؤدي الكثير منها مباشرة إلى البحيرات الحضرية[3] أو الخيران (الخلجان الصغيرة) أو الساحلية أو الشواطئ. وفيما تعمل محطات معالجة مياه المجاري على التخلص من البكتيريات والملوثات الضارة الأخرى الناشئة عن الصرف، فإن مياه السيل الجارية على السطح لا تعالج عادة. ونظرا إلى أن هذه المياه تأتي من مساحة واسعة وليس من مصدر واحد، فإنها تصنف كمصدر تلوث غير ثابت. وقد أعلنت وكالة حماية البيئة أن هذا النوع من التلوث هو أهم الأسباب المتبقية للمشكلات المتعلقة بجودة المياه في الولايات المتحدة.

وتحمل مياه السيول الجارية الأسمدة ومبيدات الآفات والمعادن الفلزة[4] والكيمياويات، ولكن الخطر الأكبر على صحة الإنسان يأتي من الميكروبات الممرضة: بكتيرات وڤيروسات وبرزويّات[5]. البراز: إذ يقدّر أن غراما واحدا من براز الكلب، مثلا، يحتوي على عدد يصل إلى ثلاثة وعشرين مليون بكتيرة. (وبالنسبة إلى أنواع معينة من البكتيرات الخطرة، فإنه يمكن لعدد ضئيل يصل إلى عشرة فقط من هذه الكائنات الحية أن يتسبب في الإصابة بالعدوى). وتتلقى مستجمعات مياه الأمطار في المناطق العمرانية والضواحي دفقا ثابتا من روث الحيوانات المنزلية كالكلاب والقطط ومن الحيوانات البرية كالراكون والسنجاب. وفي المناطق المزروعة، تتسرب مياه الأمطار والمياه الجارية على السطح خلال التربة. ويؤدي ذلك إلى تنقية المياه من بكتيرات البراز والڤيروسات، ومن ملوثات أخرى كثيرة. وخلافا لذلك، فإن السطوح الكتيمة تتسبب

(*) The Coastal Boom
(1) الناشئة عن البراز
(2) Coastal Trends Report
(3) urban
(4) heavy metals
(5) أو الأوالي أو الحيوانات الوحيدة الخلية. (التحرير)

في تراكم الملوثات أثناء فترات الجفاف وتدفق تركيزات عالية من الملوثات مع مجرى المياه عندما تهطل الأمطار.

وتصبح المشكلة مثيرة للقلق بشكل خاص على طول الساحل لأن الميكروبات تلوث مهاد المحار والمناطق المستخدمة للترويح. والمحار من الكائنات التي تتغذى باستخلاص غذائها من المياه بالترشيح، أي إنه يصفي من جسمه كميات كبيرة من مياه البحر لتركيز المواد الغذائية كالطحالب المجهرية. ولكنه في الوقت نفسه يركز الكائنات الضارة الموجودة في المياه. وإذا أكل الإنسان محارا نيئا أو غير مطبوخ طبخا جيدا، وكان تم استخراجه من مياه

بيانات واردة من خمس مقاطعات ساحلية بولاية نورث كارولينا واكتشف وجود ارتباط قوي بين الزيادة في عدد السكان وإغلاق مهاد المحار. ففي عام 1984، عندما بلغ عدد السكان في المقاطعات الخمس 125 352 نسمة، تم إغلاق 275 35 فدانا من المياه التي يعيش فيها المحار. وبحلول عام 2003، ارتفع عدد سكان المقاطعات الخمس مجتمعة إلى 596 501 نسمة وبلغت المساحة المغلقة 304 42 فدادين.

ويشكل التلوث الميكروبي أيضا خطرا شديدا على الأشخاص المشتغلين بالأنشطة الترويحية الشائعة، كالسباحة وركوب الأمواج والخوض

لا تشرب هذه المياه[*]

في السنوات الأخيرة، تسبب كثير من هذه الميكروبات في تفشي أمراض خطيرة في الولايات المتحدة وكندا. ففي عام 1993، أصابت برزويات داء البويغات الخفي مياه شبكة الشرب في ميلووكي بالعدوى، وأدى ذلك إلى وفاة أكثر من مئة شخص وإصابة 000 400 شخص بالأمراض. وفي عام 1999، نتجت من تفشي الإشريكية القولونية والبكتيرات الحلزونية (الكامبيلوباكتر) حالتا وفاة و 116 إصابة بالأمراض بين زوار المعرض

يرجع السبب في 85 في المئة من أوامر إغلاق الشواطئ والتحذيرات بشأنها إلى اكتشاف أعداد كبيرة من بكتيرات البراز.

ملوثة بميكروبات البراز، فإنه يعرض نفسه لخطر الإصابة بالتهاب المعدة والمعى (وهو مرض من أعراضه القيء والإسهال وآلام المعدة) وأمراض قاتلة أكثر حدة.

ولحماية مستهلكي المحار، يُطلب إلى الوكالات الحكومية وضع لافتات في مهاد المحار الملوثة لإعلام الجمهور أن صيد البطلينوس (أم الخلول) أو بلح البحر أو محار الجندفلي في هذه المناطق مخالف للقانون. وقد وضعت دائرة الصحة العامة بالولايات المتحدة معيارا وطنيا لسلامة مهاد المحار باستخدام مقاييس لبكتيرات البراز القولونية، وهي فئة عريضة من الأحياء الميكروية توجد في أمعاء الإنسان والحيوان. فلا يجوز صيد المحار من المنطقة إذا زاد الوسط الهندسي[1] لعدد البكتيرات في 30 مجموعة من العينات على 14 وحدة من الوحدات المكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر من مياه البحر. وفي عام 1995، وهو آخر عام أعدت فيه الإدارة الوطنية لشؤون المحيطات والغلاف الجوي سجلا وطنيا للمحار[2]، كان صيد المحار مقيدا أو محظورا في 31 في المئة من أمكنة نمو المحار في الدولة. وقد ذكرت الإدارة في تقرير رسمي لها أن مياه السيل الجارية في المناطق العمرانية هي أكثر مصادر التلوث التي تغزو مهاد المحار.

وفي الآونة الأخيرة، قام المختبر الذي أعمل به في جامعة نورث كارولينا، بتحليل

في المياه والغطس والغوص بالأنبوب والتزلج على المياه ورياضة الزوارق. وإذا لوثت الكائنات الحية الموجودة في البراز بحيرة أو نهرا أو شاطئ بحر، يصبح أي شخص في المياه عرضة للإصابة بالعدوى من الميكروبات التي تدخل من خلال الفم أو الأنف أو العينين أو الجروح غير الملتئمة. ومن الأمراض التي تتسبب فيها ملامسة المياه التهاب المعدة والمعى والتهاب ملتحمة العين والتهاب النسيج الخلوي (تهيج البشرة، كالحكة التي يصاب بها السباحون)، والتهابات الأذن والجهاز التنفسي، وأمراض أكثر خطورة كالتهاب الكبد ومتلازمة جيلان باريه، وهي خلل التهابي يصيب الأعصاب الطرفية ويمكن أن يؤدي إلى الشلل. ومن أنواع البكتيرات التي يحملها المياه والتي يمكن أن تتسبب في هذه المشكلات الصحية **الإشريكية القولونية** Escherichia coli و**المطثيات الحاطمة** Clostridium perfringens وأنواع مختلفة من **المكورات المعوية** Enterococcus و**الأيروموناس** Aeromonas و**البكتيرات الحلزونية (الكامبيلوباكتر)** Campylobacter و**السلمونلة** Salmonella و**الشيگلة** Shigella و**اليرسينيا** Yersinia. ومن الفيروسات الكثيرة التي تحملها المياه وتتسبب في الأمراض فيروس التهاب الكبدي A ونورووك Norwalk. وتشمل البرزويات المُمْرضة داء **البويغات الخفي** Cryptosporidium و**الأميبة الباطنة** Entamoeba و**الجيارديا** Giardia.

في مقاطعة واشنطن بنيويورك بعد أن شربوا مياه سيل ملوثة مصدرها مخزن غلال للماشية. وفي عام 2000، وقع سكان ووكرتون في أونتاريو ضحية لعدوى بالإشريكية القولونية والبكتيرة الحلزونية تسببت في إصابة 2300 شخص بأمراض وحدوث سبع وفيات، معظمهم من كبار السن والأطفال الرضع. ومرة أخرى تم تتبع التلوث حتى مصدره وهي مياه سيل محملة بالميكروبات تدفقت من مخزن علف للماشية ودخلت إلى مآخذ إمداد مياه الشرب في المدينة.

ويقوم موظفو الصحة بقياس تركيزات مؤشرات بكتيرية متنوعة لتقييم الخطر الناتج من الكائنات الممرضة التي تحملها المياه، وبخاصة في جوار الشواطئ؛ وعندما ترتفع أعداد البكتيرات فوق حد معين، تصدر السلطات تحذيرات من تلوث المياه أو تغلق الشواطئ أمام السباحة والأنشطة الترويحية الأخرى. وتوصي وكالة حماية البيئة بأن تستخدم الولايات بكتيرات المكورات المعوية كمؤشر لسلامة مياه المحيط والخلجان[3]. وبموجب معايير وكالة حماية البيئة، تعتبر مياه البحر غير مأمونة إذا زاد الوسط الهندسي لخمس عينات من المكورات المعوية جمعت في

(*) Don't Drink the Water

(1) geometric mean: هو نوع من المتوسطات يحدُّ من تأثير القيم المتطرفة.

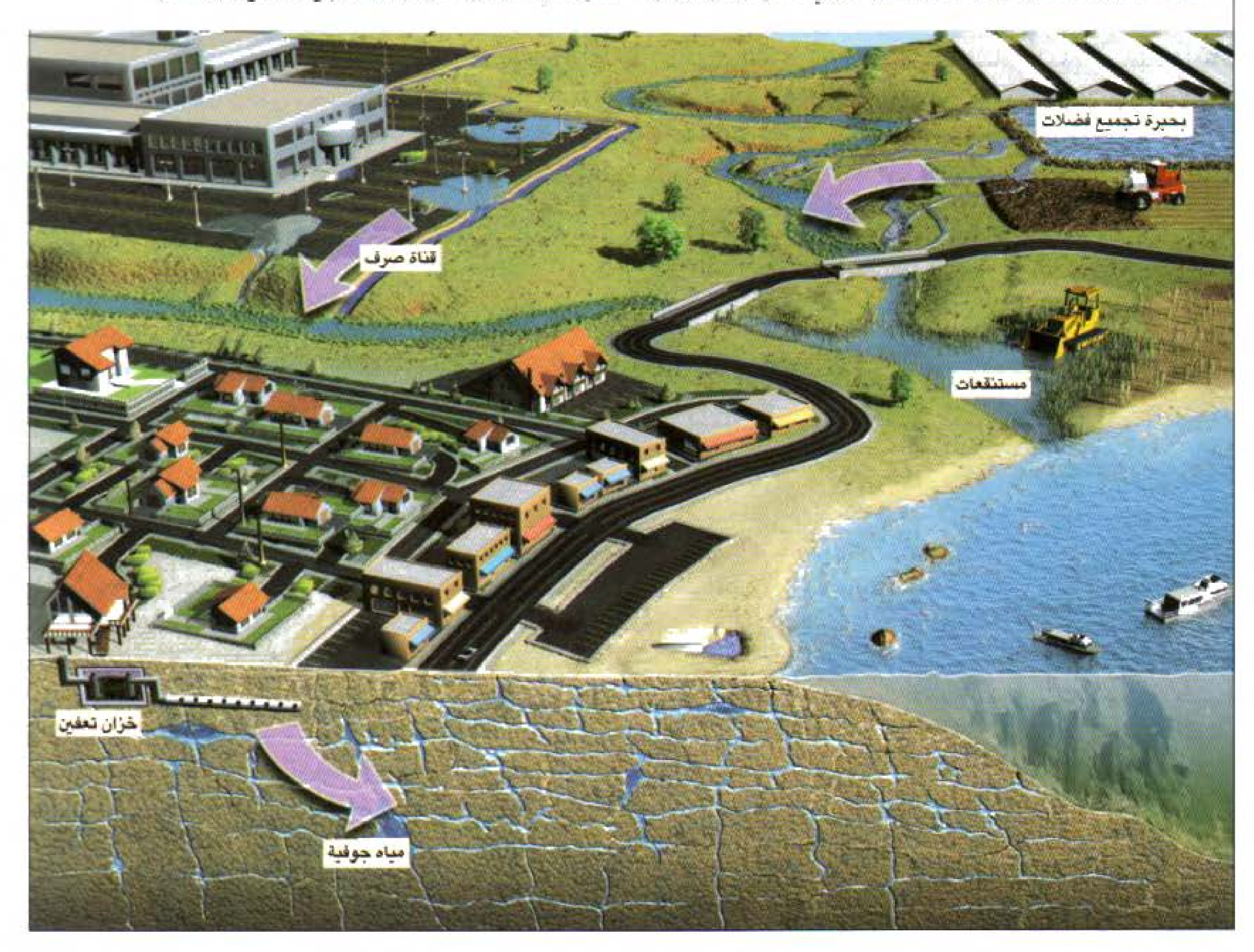
(2) national shellfish register

(3) bays

(التحرير)

انتقال ميكروبات البراز(*)

إن سوء التخطيط العمراني هو السبب الرئيسي للتلوث الميكروبي في المناطق الساحلية. وعلى سبيل المثال، فإن غالبية مراكز التسوق محاطة بمساحات كبيرة من مواقف السيارات التي توجّه مياه السيول الجارية المحملة بالفضلات إلى قنوات الصرف. وفي كثير من المناطق العمرانية السكنية الساحلية، تتدفق مياه المجاري المندفعة من خزانات التعفين عبر طبقات من الحجر الجيري المشقق أو التربة الرملية مما يسمح بتسرب ميكروبات البراز إلى المياه الجوفية. وعادة ما تؤدي عمليات تربية الماشية الواسعة النطاق إلى نشر روث الحيوانات في الحقول أو تخزينه في أحواض خاصة، وقد تجرف الأمطار الغزيرة هذه الفضلات إلى الأنهار القريبة. وغالبا ما تدمر عمليات الإنشاء الجديدة الأراضي الرطبة التي تقوم بتنقية المياه من الكائنات الحية المُمْرِضة قبل أن تتمكن من الوصول إلى الشواطئ ومهاد المحار.



30 يوما على 35 وحدة مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر أو إذا زادت أي عينة فردية عن 104 وحدات مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر. وفي المياه العذبة تصل الحدود التي قررتها وكالة حماية البيئة لمتوسط التركيزات إلى 33 وحدة مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر فيما يتعلق بالمكورات المعوية وإلى 126 وحدة مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر فيما يتعلق بالإشريكية القولونية. ولكن هذه المعايير ربما تتسم بقدر مبالغ فيه من التساهل. وقد قدرت وكالة حماية البيئة أن السباحة في وجود الحد الأقصى للأعداد المقبولة سوف تتسبب في إمراض 2 في المئة من المستحمين.

أعلى الخور(**)

درس الباحثون الأضرار البيئية الناتجة من التغطية بالسطوح الكتيمة منذ أواخر الثمانينات. ولكن المختبر الذي أعمل به كان أول من درس تأثيرها في أعداد بكتيرات البراز. وتركزت دراستنا على مقاطعة نيو هانوفر وهي منطقة سريعة النمو في نورث كارولينا. ففيما بين عامي 1990 و 2000 زاد عدد السكان في المقاطعة بنسبة 25 في المئة. ومن المتوقع أن يزيد هذا العدد أيضا بنسبة 31 في المئة بحلول عام 2020. وفي العقد الماضي، قام فريق البحث التابع لي بدراسة جودة المياه في ستة خيران مديّة في مناطق تتجه نحو التحضر العمراني في المقاطعة. وقمنا بتحليل أكثر من 1000 عينة من بكتيرات البراز القولونية والإشريكية القولونية أخذت من جميع مناطق الخيران. وبحثنا عن ارتباطات بين أعداد البكتيرات والسمات المختلفة لمستجمعات مياه الخيران من حيث ديموغرافيتها(1) ومناظرها الطبيعية.

وقد وجدنا أن متوسط أعداد بكتيرات البراز القولونية كان أعلى بشكل عام في الخيران التي يعيش حولها عدد أكبر من الأشخاص والتي توجد حول مستجمعاتها

(*) FECAL MICROBES ON THE MOVE
(**) Up the Creek
(1) الكثافة السكانية فيها

المائية نسبة مئوية أعلى من الأراضي العمرانية. ولكن أعداد البكتيرات كانت ترتبط ارتباطا قويا بانتشار السطوح الكتيمة. ففي خور فاتش ـ حيث تغطي السطوح الكتيمة 7 في المئة فقط من الأراضي ـ كان متوسط عدد البكتيرات القولونية 12 وحدة مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر. في حين وصل العدد إلى أكثر من سبعة أضعاف هذه القيمة في خور برادلي ـ حيث يغطي الأسفلت والخرسانة 22 في المئة من مستجمعات المياه [*انظر الإطار في الصفحة 34*]. كما كان الارتباط قويا جدا بين أعداد الإشريكية القولونية والنسبة المئوية للسطوح الكتيمة حول مستجمعات المياه. ولم تكن

والربط بالتربة يحمي البكتيرات من الأشعة فوق البنفسجية التي تقتل الكائنات الحية عادة كما تستطيع البكتيرات الحصول على العناصر المغذيّة من مثل الكربون والنتروجين والفسفور من حبيبات التربة. ويمكن أن تجد الميكروبات وسائل انتقال عبر مسافات طويلة باتجاه مجرى المياه مع الرواسب. وفي دراستنا للخيران المدّية في مقاطعة نيو هانوفر، وجدنا ارتباطا مهما إلى درجة كبيرة بين العكارة (التكدر) ووفرة بكتيرات البراز القولونية. وأسفرت دراسات أخرى أجريت في خليج تشيسابيك (بغرب فلوريدا) وساحل البحر الأبيض المتوسط وأستراليا عن نتائج مماثلة.

الرمل ومياه الصرف الصحي لا يختلطان[*]

يمكن أن تسهم نظم الصرف الصحي الرديئة التصميم في الأقاليم الساحلية أيضا في التلوث الميكروبي. وفي المجتمعات المحلية التي يتم فيها تصريف مياه الأمطار في بالوعات الصرف، يمكن أن تتسبب الأمطار الغزيرة في تدفقات زائدة تلقي بمياه فضلات الإنسان غير المعالجة في الأنهار والبحيرات والخلجان. وتعالج بلديات كثيرة هذه المشكلة حاليا بالفصل بين شبكات المجاري ونظم صرف مياه الأمطار. ولكن ثمة مشكلة أخرى بدأت تظهر في المناطق الساحلية، حيث لا يجد السكان وصلات للصرف فيضطرون إلى

من الممكن أن تنتقل ميكروبات البراز القادمة من خزانات التعفين، في منطقة فلوريدا كيز في أقصى جنوب شبه جزيرة فلوريدا، إلى المياه الساحلية في غضون ساعات.

النتيجة التي توصلنا إليها مختلفة عما توصل إليه الآخرون. وفي وقت لاحق، أبلغ <F .A> هولاند> و<M .D> سانجر> وزملاؤهما [في مصلحة الموارد الطبيعية بساوث كارولينا] عن وجود ارتباط مهم بين أعداد بكتيرات البراز القولونية والمساحة المغطاة بالسطوح الكتيمة في المستجمعات المائية لاثنين وعشرين خورا مدّيا في المنطقة المحيطة بالعاصمة شارلستون.

وتشير هذه النتائج إلى أن مياه السيل القادمة من المناطق العمرانية قد يكون لها تأثير مضاعف في تركيزات البكتيرات في اتجاه مجرى المياه. فالتدفقات العالية بشكل غير عادي والقادمة من مواقف السيارات الكبيرة أو تقسيمات الأراضي قد تسبب حت (تآكل) قنوات الصرف وضفاف الأنهار، ومن ثم حمل الرواسب العالقة إلى المياه. كما أن هذه الرواسب تنجرف بسهولة من مواقع البناء، حيث تكون التربة قد تعرت من النباتات. وتغيّم الرواسب العالقة والجزيئات الأخرى المياه التي تستقبلها (ويطلق على درجات التغييم «العكارة»). والأدهى من ذلك أن الرواسب، وبخاصة الرواسب الطينية، يمكن ربطها فيزيائيا وكيميائيا بملوثات كالأمونيوم والفسفات والمعادن النزرة وبكتيرات البراز والفيروسات.

وتوافر الرواسب القاعية في المياه الساحلية الضحلة أيضا حوضا لتجميع بكتيرات البراز والميكروبات الأخرى. وقد وجد فريق بحث برأسه <B .L> كاهون> [وهو زميلي في جامعة نورث كارولينا في ولمنكتون] تركيزات عالية من الكائنات الحية الممرضة ـ تشمل بكتيرات البراز القولونية **والمكورات المعوية** enterococci و**المكورات العقدية (البكتيرات السبحية)** streptococci في رواسب الخيران المدّية. وتستطيع الميكروبات البقاء فترات طويلة في الرواسب، لأنها تكون في مأمن من الأشعة فوق البنفسجية وتجد غذاءها بسهولة. ونظرا إلى ضحالة الخيران المدّية بشكل عام، فإن إثارة الرواسب الموجودة في القاع عند ملامسة الإنسان لها يمكن أن تؤدي إلى تعلق أعداد كافية من البكتيرات في المياه بما يتجاوز معايير السلامة. فمن السهل أن تتسبب حركة الرياح أو خوض الأطفال والحيوانات الأليفة في المياه في تلوث هذه المياه بمجرد ملامسة الأقدام للقاع الطيني للخور. وإضافة إلى ذلك، وجد الطلبة العاملون معنا تركيزات عالية من ميكروبات البراز في الرواسب القريبة من عدد من المراسي العامة للزوارق. وتوجد هذه المراسي في كل مكان وتستخدم بكثرة في الأقاليم الساحلية في الجنوب الشرقي.

إلقاء فضلاتهم في خزانات التعفين.

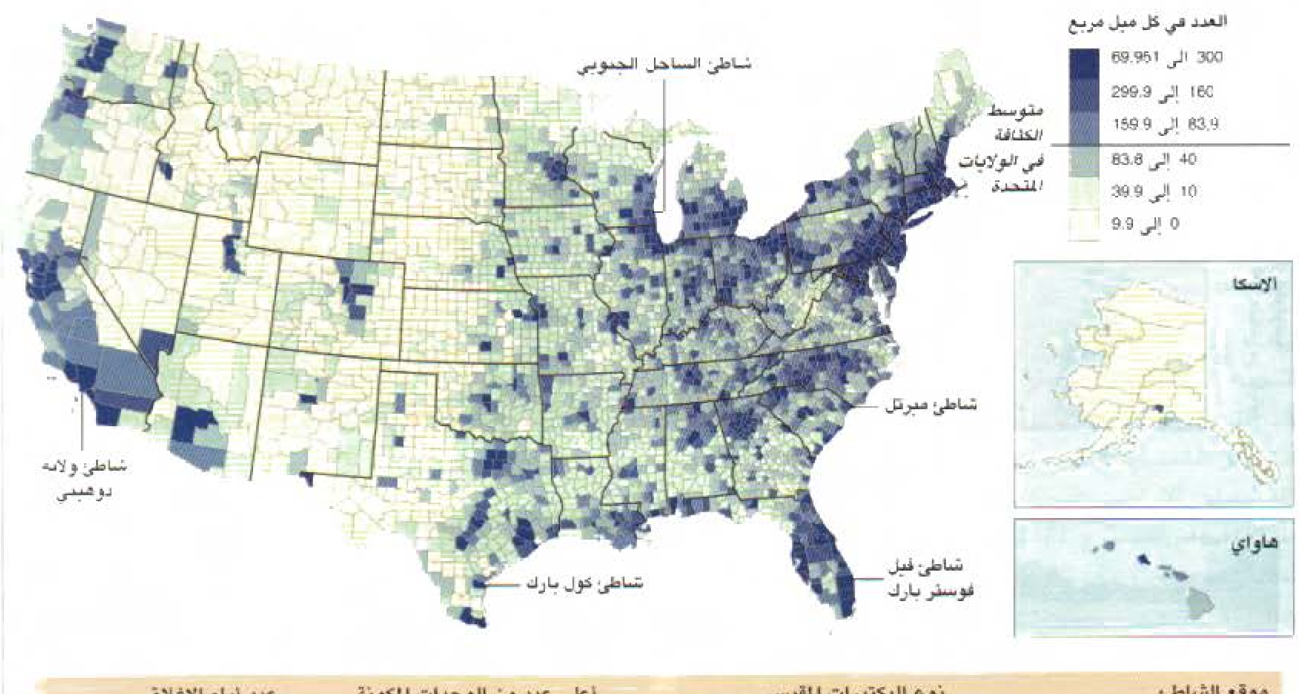
ومن هذه المناطق منطقة فلوريدا كيز التي يوجد بها أكثر من 25 000 خزان من خزانات التعفين. والشكل السائد لسطح الأرض في هذه المنطقة هو طبوغرافيا الكهوف ـ فالتربة تحت الأرض تتكون أساسا من الحجر الجيري، الذي تتخلله شقوق كثيرة وفجوات غائرة ناتجة من التحات. وهذا التكوين الجيولوجي شديد المسامية ولذلك فإنه لا يساعد على الترشيح الفعال لمياه الفضلات الغنيّة بالبكتيرات المتدفقة من خزانات التعفين. وفي عام 1995، وجد فريق بحث يترأسه <H .J> بول> و<B .J> روز> [من جامعة ساوث فلوريدا] أن ميكروبات البراز القادمة من نظم خزانات التعفين في منطقة فلوريدا كيز تنتقل بسهولة خلال التربة. ويمكن أن تصل إلى المياه الساحلية بالقرب من الشاطئ خلال ساعات.

ولا تقتصر المشكلة على منطقة فلوريدا كيز وحدها. فالتربة الرملية على طول الساحل تتخللها فضوات (أحياز) كبيرة نسبيا بين حبيبات الرمل. وعندما تتشبع هذه التربة بالمياه يمكن للبكتيرات والفيروسات أن تنتقل بسهولة خلالها. وعلى سبيل المثال، فإن المناطق التي تحتوي على تربة رملية ويرتفع فيها

(*) Sand and Sewage Don't Mix

الشواطئ الأمريكية الملوثة(*)

في الولايات المتحدة، إن أكثر الشواطئ والخلجان تلوثا تقع بشكل عام في المقاطعات الساحلية الكثيفة السكان. وقد أدى التلوث البكتيري إلى إغلاق المناطق الموضحة أدناه أو إصدار تحذيرات بشأنها في عام 2004 [آخر عام توافرت عنه السجلات على المستوى الوطني] وكانت أعلى الأعداد المسجلة في كل شاطئ يزيد كثير عن معايير السلامة في فرادى العينات من المكورات المعوية والإشريكية القولونية حيث نصت على التوالي 104 وحدات و235 وحدة مكونة للمستعمرات في كل 100 مليلتر



موقع الشاطئ	نوع البكتيرات المقيس	أعلى عدد من الوحدات المكونة (للمستعمرات في كل 100 مليلتر)	عدد أيام الإغلاق والتحذيرات
شاطئ ولاية دوهيني مقاطعة أورانج، كاليفورنيا	*المكورات المعوية*	38.800	312
شاطئ فيل فوستر بارك مقاطعة بالم بيتش، فلوريدا	*المكورات المعوية*	600	108
شاطئ الساحل الجنوبي مقاطعة ميلووكي، ويسكونسن	*الإشريكيات القولونية*	2.419	72
شاطئ ميرتل مقاطعة هوري، ساوث كارولينا	*المكورات المعوية*	1.130	54
شاطئ كول بارك مقاطعة نويسيس، تكساس	*المكورات المعوية*	14 400	53

المصدر: مكتب الاحصاء (التعداد) الرسمي بالولايات المتحدة (الخريطة)؛ وكالة حماية البيئة الأمريكية؛ مجلس الدفاع عن الموارد الطبيعية؛ برنامج حماية مياه المحيط بمقاطعة أورانج؛ مكتب صحة الشواطئ بويسكونسن والأراضي العامة بتكساس (الجدول)

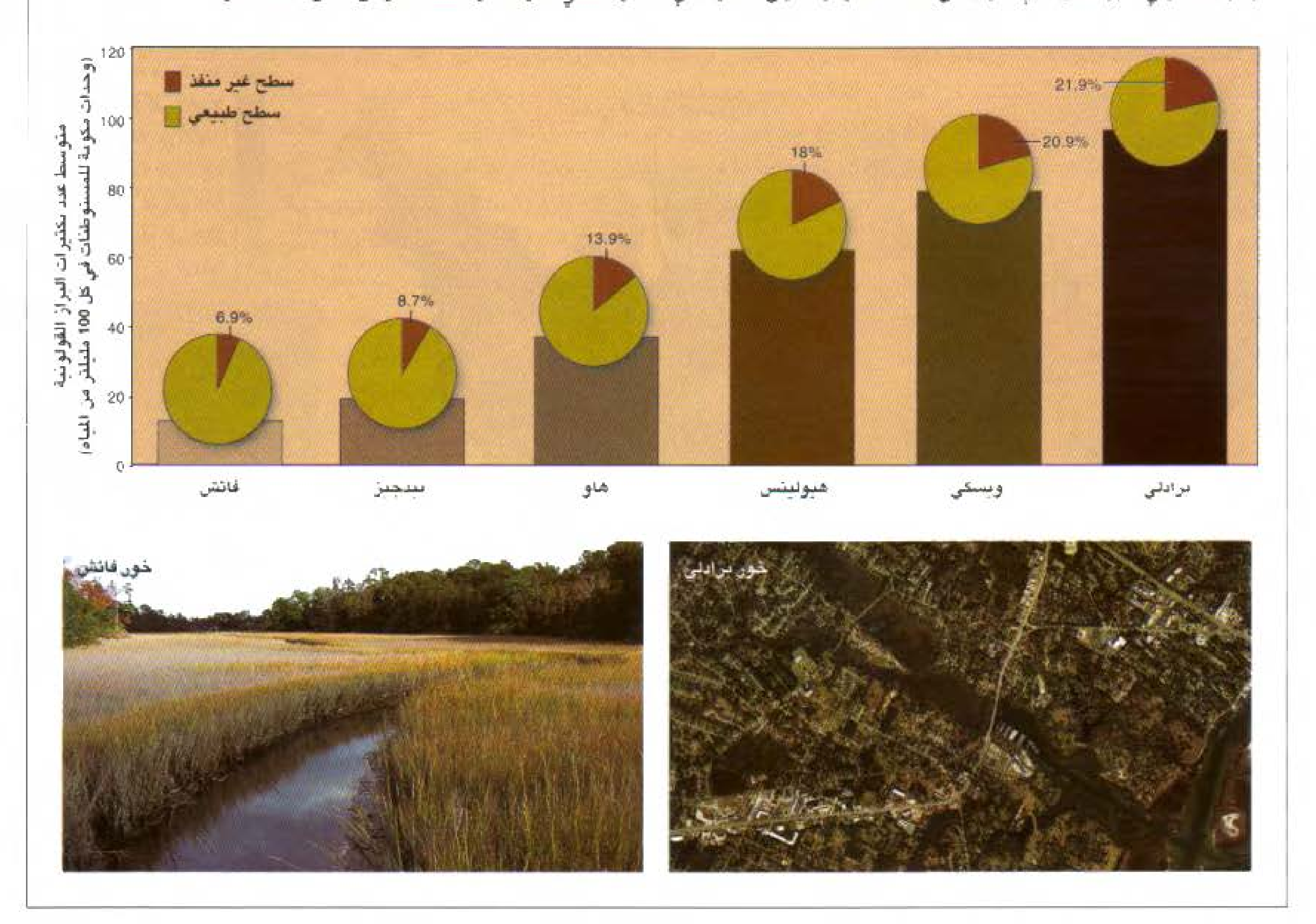
منسوب المياه الجوفية لا تناسب نظم خزانات التعفين. ومع ذلك فإن سوء التخطيط سمح بوجود هذه النظم في أقاليم ساحلية كثيرة سريعة النمو. تشمل بعض الجزر الرملية الحاجزة (العائقة) على طول سواحل الأطلسي وخليج[1] المكسيك. وفي دراسة عن جودة المياه في مقاطعة برونزويك في نورث كارولينا، التي يوجد بها كثير من خزانات التعفين في التربة الرملية (ويصل عددها إلى 20 خزانا في كل هكتار)، وجد «كاهون» أعدادا كبيرة من بكتيرات البراز القولونية الناشئة عن المواقع الكثيفة السكان في المياه العذبة ومياه البحر باتجاه مجرى المياه. والأدهى من ذلك، يبدو أن نظم القنوات وشبكات المجاري التي تخدم المناطق العمرانية تسهّل، فيما يبدو، تصريف بكتيرات البراز في المياه القريبة، بما في ذلك مهاد (أمكنة نمو) المحار.

وقد حدد باحثون آخرون أنماطا مميزة لشدة التلوث الميكروبي. حيث توصلت «A. K ليب» [التي تعمل في جامعة جورجيا] وزملاؤها إلى أن أعداد بكتيرات البراز في الخلجان والروافد، التي تطل عليها مجتمعات ساحل خليج فلوريدا كمبا. شارلوت وخليج ساراسوتا. تزيد زيادة

(*) AMERICA'S SULLIED BEACHES
(1) Gulf

تأثيرات الخرسانة والأسفلت(*)

وجدت دراسة لستة خيران مدّية في مقاطعة نيو هانوفر بنورث كارولينا ارتباطا قويا بين التلوث الميكروبي وانتشار السطوح الكتيمة، كمواقف السيارات والطرق والأرصفة. وفي خور فانش الذي ما زال على حالته الطبيعية الأولى نسبيا (في اليسار)، حيث تغطي السطوح الكتيمة أقل من 7 في المئة من مستجمع المياه، كان متوسط أعداد بكتيريات البراز القولونية أقل كثيرا منه في خور برادلي (في اليمين)، حيث تغطي الخرسانة والأسفلت أكثر من خمس المنطقة المحيطة.



حادة مع المد المتجه إلى الخارج. وتنتقل الميكروبات بسهولة خلال التربة المشبعة الرملية التي تحيط بحقول خزانات التعفين الكثيرة إلى الخيران القريبة لتنصرف في الخلجان. وهذا النمط لا يرتبط بالمد فحسب، بل يتغير بتغير الأحوال الجوية أيضا. واكتشف الباحثون أنه في السنوات المطيرة التي توافق حدوث ظاهرة النينيو المناخية تكون المياه في خليج تامبا أكثر تلوثا بدرجة كبيرة ببكتيرات البراز والفيروسات منها في السنوات الجافة. وهذا التأثير هو نتيجة زيادة مياه السيول الجارية على السطح وحركة المياه الجوفية خلال التربة المشبعة حول خزانات التعفين الواقعة في أمكنة غير مناسبة.

وفي كاليفورنيا الجنوبية، حيث تتدفق كميات كبيرة من مياه السيول القادمة من المناطق العمرانية إلى المحيط الهادي، وجدت <R. نوبل> [من جامعة نورث كارولينا في تشابل هيل] وزملاؤها أن امتداد خط الساحل الذي لا تنطبق عليه معايير السلامة كان أكبر عشرة أضعاف بعد هطول الأمطار مما كان عليه في فترات الجفاف. وعلى المستوى الوطني، تُغلق مهاد المحار بصورة آلية لعدة أيام أو أسابيع بعد هطول الأمطار، لأن هذه المناطق تكون عرضة للتلوث البكتيري من مياه السيول الجارية.

ولكن مياه السيول المتدفقة من المناطق العمرانية والمواد المتسربة من خزانات التعفين ليستا دائما المتهمين الرئيسيين بالتلوث الميكروبي. فالعامل الرئيسي في المناطق الريفية الساحلية التي يكون الصرف فيها في الجداول المائية هو الفضلات القادمة من مزارع الماشية. وفي السهل الساحلي[1] الممتد من ماريلاند إلى فلوريدا وفي بعض مناطق الساحل المطلة على الخليج، حلت محل معظم مزارع الماشية التقليدية منشآت صناعية عملاقة تربى فيها أعداد هائلة من الخنازير والدواجن والماشية في أمكنة محكمة الإغلاق. وتتخلص هذه المنشآت من كميات الروث الهائلة إما برشها كسائل أو نشرها كقمامة على الحقول القريبة. وإذا تم الرش أو النشر قبل وقت قصير من هبوب عاصفة مطيرة أو أثناءها، يمكن أن تنتقل ميكروبات البراز من الفضلات إلى الجداول القريبة عن طريق مياه السيول القادمة من البر.

(*) THE EFFECTS OF CONCRETE AND ASPHALT

(1) coastal plain

مستقبل أنظف(*)

من الواضح أنه لحماية مياه أمريكا الساحلية، يتعين على شركات المقاولات والبناء الإقلاع عن ممارساتها المدمرة الحالية - بما في ذلك قطع الأشجار والصرف في الأراضي الرطبة والاستخدام الواسع النطاق لمواد مكانها. وعلى سبيل المثال، يمكن حاليا رصف مواقف السيارات بخرسانة مسامية، وهي مادة شبه كتيمة تسمح بانتقال المياه إلى التربة السفلية وتوافر مع ذلك الدعم الإنشائي الكافي للسيارات. ويمكن لنظم التجميع الحديثة إفراغ مياه السيول من خلال أقماع من مواقف السيارات إلى مرشحات تستخدم فيها طبقات من المعادن الماصة والمواد العضوية لتطهير التربة الرملية وفي المناطق ذات الطبوغرافيا الكهفية بوضوح إلى أن الأقاليم الساحلية تحتاج إلى نظم أكثر تقدما لمعالجة مياه الصرف الصحي. ولكن بعض جماعات الحفاظ على البيئة أشارت إلى أن إنشاء نظم صرف صحي مركزية سوف يؤدي إلى مزيد من العمران ومزيد من تلوث المياه. وهكذا، فعندما تبني المجتمعات المحلية الساحلية نظم الصرف، ينبغي للسلطات البلدية أن تضع قيودا على التغطية بالسطوح الكتيمة في عمليات البناء الجديدة، بحيث تقتصر، مثلا، على 10 أو 15 في المئة من المساحة الكلية (وبخاصة بالقرب من مهاد المحار).

المحافظة على الأراضي الرطبة(1) هي طريقة فعالة لحماية المياه في آخر مجاريها من التلوث الميكروبي.

الرصف - والانتقال إلى استراتيجيات التنمية الذكية. ويجب على المصممين، عند التخطيط للمنتجعات الجديدة ومراكز التسوق والمجمعات الإدارية وتقسيمات الأراضي السكنية، الحد من استخدام السطوح الكتيمة وزيادة المساحات المزروعة بالنباتات. فالموقع الذي تكثر فيه المساحات الخضراء بين المساحات المرصوفة يقل فيه الجريان السطحي لمياه السيل، ذلك أن تغلغل المياه في التربة سوف يساعد على التخلص من كثير من المواد الملوثة المتدفقة من الأسفلت والخرسانة.

ويتعين بشكل خاص، المحافظة على الأراضي الرطبة وزيادتها إن أمكن، للمحافظة على الترشيح الطبيعي لمياه السيل. وفي دراسة لأحد عشر جدولا في السهل الساحلي لنورث كارولينا، وجد المختبر الذي أعمل به أنه في مستجمعات المياه التي يكون غطاء الأراضي الرطبة فيها كبيرا نسبيا - وهو في هذه الحالة أكثر من 13.5 في المئة - لم تتسبب فترات هطول الأمطار في زيادة كبيرة في أعداد بكتيرات البراز القولونية. وتشير النتائج إلى أن المحافظة على الأراضي الرطبة (وزيادتها المفترضة) هي طريقة فعالة لحماية المياه في آخر مجاريها من الرواسب العالقة والتلوث الميكروبي. وتستطيع شركات البناء المساعدة في هذا الجهد بالحد من وصول مياه السيول الجارية المحملة بالرواسب الصادرة عن مواقع البناء.

وينبغي لشركات المقاولات أن تستفيد من التقنيات الحديثة التي يمكن أن تقلل من كمية مياه الأمطار الجارية، وحتى أن تعالجها في المياه الملوثة (ويمكن أيضا تقليص حجم الأمكنة الكبيرة لمواقف السيارات، لأن معظمها قد بني ليلائم التسوق في أيام العطلات، لا ليلائم حركة المرور اليومية). ويمكن استخدام هذه التقنيات في المنشآت الموجودة والمنشآت الجديدة أيضا. وإذا أراد مجتمع ما خفض التلوث الناتج من مياه السيل الجارية لإحياء شواطئه أو لإنقاذ صناعة المحار الوطنية، يمكنه تركيب مرشحات في جميع مواقف السيارات، وإنشاء مناطق نباتية عازلة على طول الأنهار وقنوات الصرف، وإعادة إنشاء الأراضي الرطبة في مواقع مختارة.

ويشير الأداء السيئ لنظم المجارير في

ويمكن للسواحل الأمريكية أن تكون مقصدا رائعا لقضاء الإجازات والانتقال للسكنى بها ولإقامة المشاريع التجارية. ومع ذلك، فما لم يتوافر التخطيط الجيد والرغبة السياسية في حماية الموارد الساحلية، ستظل الشواطئ الخلابة والخلجان المتلألئة بالأضواء والخيران المدّية الهادئة أمكنة خطرة تتجمع فيها فضلاتنا. ويجب علينا أن نتأكد من أن التنمية العمرانية غير المدققة لن تؤدي إلى تدمير الخصائص الحقيقية التي يرجع إليها الفضل في اجتذاب الناس إلى السواحل. ■

(*) A Cleaner Future
(1) wetlands

المؤلف

Michael A. Mallin

عالم متخصص في الإيكولوجيا المائية (علم التبيؤ المائي)، درس بشكل مستفيض تلوث المياه العذبة والمصبات النهرية والمنظومات البحرية الساحلية. وهو حاليا أستاذ باحث في مركز العلوم البحرية بجامعة نورث كارولينا. حصل «مالين» على الدكتوراه في بيولوجيا البحار والمصبات النهرية من جامعة نورث كارولينا في تشابل هيل. وتشمل اهتماماته البحثية تحليل أثر ممارسات استخدام الأراضي في جودة المياه ودراسة تأثير تراكم العناصر المغذية والأحداث الجوية الكارثية.

مراجع للاستزادة

Effect of Human Development on Bacteriological Water Quality in Coastal Watersheds. Michael A. Mallin, Kathleen E. Williams, E. Cartier Esham and R. Patrick Lowe in *Ecological Applications*, Vol. 10, pages 1047–1056; 2000.

Demographic, Landscape, and Meteorological Factors Controlling the Microbial Pollution of Coastal Waters. Michael A. Mallin, Scott H. Ensign, Matthew R. McIver, G. Christopher Shank and Patricia K. Fowler in *Hydrobiologia*, Vol. 460, pages 185–193; 2001.

Linkages between Tidal Creek Ecosystems and the Landscape and Demographic Attributes of Their Watersheds. A. F. Holland, D. M. Sanger, C. P. Gawle, S. B. Lerberg, M. S. Santiago, G. H. M. Riekerk, L. E. Zimmerman and G. I. Scott in *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 298, pages 151–178; 2004.

More information can be found online at **www.nrdc.org/water/oceans/gttw.asp** and **www.epa.gov/beaches/**

Scientific American, June 2006

إنعاش مناطق ميتة(*)

كيف نستطيع إنعاش البحار الساحلية المتأذية من طفرة النمو النباتي والطحالبي الناجمة عن الفعاليات البشرية؟

<ل. مي>

تخيل ساحلا مكتظا بالمتنزهين يتمتعون بشمس الصيف الحارة. وخلال بحث الأطفال عن الصدف ولقى أخرى في المياه الضحلة، يبدأ تقاطر حيوانات نافقة أو في طريقها إلى النفوق بالانجراف نحو الساحل بدءا من أسماك تكافح للبُقْيا(1) ثم كتل كريهة الرائحة متعفنة من **السراطين** crabs و**البطلينوس** clams و**بلح البحر** mussels والأسماك. وعلى صياح أطفالهم المذعورين يندفع الأهالي بقلق لانتشالهم من الماء. وفي هذه الأثناء تلوح في الأفق قوارب الصيد التجارية عائدة إلى المرفأ بشباك وعنابر خاوية.

لا يشكل هذا المشهد جزءا من أفلام الرعب التجارية، فقد تواتر وقوع حوادث من هذا النوع فعلا في منتجعات كثيرة على سواحل البحر الأسود في رومانيا وأكرانيا خلال السبعينات والثمانينات، حيث قدر خلال هذه الفترة هلاك نحو 60 مليون طن من **الأحياء البحرية القاعية** (bottom-living (or benthic) life نتيجة **العوز الأكسجيني** hypoxia ـ كميات من الأكسجين في الماء قليلة جدا لبُقياها ـ وذلك في رقعة من البحر فقيرة بالأكسجين إلى حد لا يسمح بوجود **حياة لابكتيرية** nonbacterial life.

وقد اتسعت هذه الرقعة الميتة في الشمال الغربي من البحر



تجلت المنطقة الميتة في البحر الأسود بوضوح حينما بدأت الأحياء المائية بالانجراف نحو الساحل قرب مصب نهر الدانوب في السبعينات. وتظهر الأسماك أعلاه منتشرة على طول ساحل البحر الأسود نتيجة المد العالي. كما تظهر صورة للساتل(3) لمنطقة غرب البحر الأسود أخذت عام 2000 (في *اليسار*) الانتشار الشاسع لنباتات مجهرية طافية على السطح نتيجة صبيب مياه النهر الغنية بالمغذيات.

بدءا من مصب نهر الدانوب، ووصلت إلى أوجها في عام 1990، حيث غطت مساحة تساوي مساحة سويسرا (000 40 كيلومتر مربع). وعلى الطرف الآخر من العالم ظهرت في خليج المكسيك قرب دلتا نهر المسيسبي منطقة ميتة شاسعة أخرى أواسط السبعينات، وصلت مساحتها إلى 000 21 كيلومتر مربع. لقد نشرت تقارير إضافية خلال العقدين الماضيين عن مناطق في طريقها إلى الموت أو الاستنزاف في البحار الساحلية والمصبات عبر العالم (*انظر الخريطة في الصفحة المقابلة*).

وقد انصب اهتمامي الأكبر خلال الأبحاث التي قمت بها منذ أوائل التسعينات، حيث نشر أولها حول **الأزمة البيئية (الإكولوجية)** ecological crisis في البحر الأسود، على تحديد أسباب هذا الدمار وكيفية تحاشي حدوثه وما يجب عمله لإعادة هذه المناطق المتأثرة إلى الحياة مرة ثانية. ولقد كشفت حاليا أعمالي وأعمال آخرين تفاصيل مهمة عن الحوادث التي تخرب المنظومات البيئية الساحلية في أجزاء عديدة من العالم وظهرت معلومات جديدة يمكنها المساعدة على إيجاد طرق **للتعافي** recovery.

تشكل المنطقة الميتة(**)

يقوم اليوم باحثو المحيطات بربط تشكل معظم المناطق الميتة بظاهرة تدعى **الإثراء الغذائي** eutrophication، أي الإغناء المكثف لمياه البحر **بالمغذيات** nutrients (المركبات المحتوية على النتروجين والفسفور بشكل رئيسي)، الذي يعزز نمو النباتات. وتعتبر كميات محدودة من هذه **المخصبات** fertilizers ضرورية لصحة **العوالق البحرية (البلانكتونات) النباتية** phytoplankton ـ الطحالب الطافية وكائنات التمثيل(2) الضوئي المجهرية التي تشكل أساس معظم السلاسل الغذائية البحرية ـ والأعشاب البحرية والطحالب التي تعيش على قيعان البحار الضحلة التي تصلها أشعة الشمس. لكن الكثرة من تلك المغذيات في هذه المواقع تؤدي إلى زيادة النمو النباتي، ومن ثم إلى انتشار كاسح للطحالب وتأثيرات أخرى غير مستحبة.

تدخل النباتات في السلسلة الغذائية عندما ترعى منها حيوانات دقيقة محمولة بالماء (**عوالق حيوانية** zooplankton) أو **أسماك عشبية** herbivorous و**كائنات قاعية ترشيحية التغذية**

(*) REVIVING DEAD ZONES

(**) Dead Zone Formation

(1) البقاء على قيد الحياة.

(2) أو التركيب أو البناء الضوئي.

(3) أو القمر الصنعي.





مناطق ميتة ـ تتكون مناطق ناضبة من الأكسجين (نتيجة التفكك البكتيري للنباتات الوفيرة)، ومن ثم خالية من معظم الحياة الحيوانية في البحار الساحلية قرب الدول المتقدمة غالبا. وقد تضاعف منذ عام 1990 عدد الدول المتأثرة. وغالبا ما يعزز جريان المياه السطحية الملوثة ظروف المنطقة الميتة، رغم حدوث بعض الحالات بشكل طبيعي. وقد تقلصت مساحة المنطقة الميتة في الجزء الشمالي الغربي من البحر الأسود كثيرا مقارنة بما كانت عليه قبل عدة عقود.

filter-feeding bottom dwellers كبلح البحر والمحار oysters، أو عندما تنفق أو تتعفن وتسقط على قاع البحر فتتعرض إلى تفكك بكتيري. وأخيرا تندمج مع رواسب القاع وهذه المادة العضوية القاعية تصبح غذاء للحيوانات الموجودة هناك، بما في ذلك **الديدان** worms **والربيان** shrimp وبعض الأسماك.

إن عدد العوالق النباتية يعتمد في الحالة الطبيعية على توافر الضوء والمغذيات وشدة الرعي. ولكن الزيادة الكبيرة في تراكيز النتروجين والفسفور تمكن هذه المتعضيات الدقيقة **الضوئية التركيب** photosynthetic من التكاثر بوفرة عالية. ويتحول لون الماء أخيرا إلى الأخضر أو البني عندما يتسارع نمو مجاميع العوالق النباتية ويحول الظل الذي تسببه دون وصول ضوء الشمس الضروري للنباتات القاطنة تحتها. وفي الخلجان الضحلة أيضا تغطي طبقة من **الطحالب المجهرية** epiphytes الأعشاب البحرية، ما يؤدي إلى اختناق تلك النباتات ونفوقها. كما يمكن للطحالب أن تغلف **الشعاب المرجانية** coral reefs وبخاصة مع الصيد الجائر الذي يحد من تنامي **الرعويات** grazers الموجودة في المنطقة.

إن الطفرة الشاملة في أعداد العوالق النباتية والطحالب الجهرية تعوق الحياة البحرية بشكل مباشر، إلا أن الوضع الأسوأ يحدث نتيجة انخفاض مستويات الأكسجين في **المياه القاعية** bottom-waters. وتنخفض تراكيز الأكسجين عندما تستهلكه البكتيرات[1] خلال تفكيك كتل المادة العضوية الناجمة عن النفايات الحيوانية والكائنات العضوية النافقة التي تزداد خلال سيرورة الإثراء الغذائي وتتراكم معظم هذه المادة فوق قاع البحر، حيث يندر وجود الأكسجين.

يأخذ الأكسجين طريقه إلى الماء، إما من سيرورة التمثيل الضوئي أو **الانتشار الفيزيائي** physical diffusion من الهواء عند سطح البحر. وإذا كان **تدارج الكثافة** density gradient في منطقة قاعها مغطى بالنباتات النافقة شديدا، بحيث يحول دون خلط عمود الماء فوقها، فإن الأكسجين عند القاع يمكن استنزافه خلال فترة قصيرة، وهذا يؤدي إلى نفوق كافة **المجاميع الحيوانية** animal communites (يمكن أن تنشأ هذه التدارجات نتيجة فروق درجة الحرارة أو ملوحة المياه على أعماق مختلفة). ولقد حدث هذا التتابع الأساس ـ إثراء غذائي يقود إلى انتشار العوالق النباتية ثم إلى نضوب الأكسجين يليه نفوق النباتات والحيوانات الموجودة ـ تقريبا في كل منطقة ميتة درسها الباحثون.

وعلى كل حال تختلف التفاصيل بحسب الظروف الحيوية والفيزيائية المحلية، وكذلك بحسب معدل وصول المغذيات من اليابسة. فعلى سبيل المثال، تعتبر مصبات الأنهار **شبه الراكدة** poorly flushed عرضة بشكل خاص لتأثيرات الإثراء الغذائي، نظرا إلى أن قلة سريان الماء تؤدي إلى البطء في **تزويد** replenishment **مياه القاع** بالأكسجين. ويعتبر هذا النقص الأكسجيني مشكلة مستمرة على طول الساحل الشرقي للولايات المتحدة، حيث تأثرت مصبات أنهار كبيرة كخليج جيزابيك Chesapeake Bay.

وفي الغالب تنتج الزيادة في كميات النتروجين والفسفور الواصلة إلى البحار الساحلية من تغير أنماط حياة الناس القاطنين في المناطق التي تصرف نحو البحر. إن الزيادة في استخدام الوقود الأحفوري (الذي يطلق النتروجين إلى الجو) وكذلك المخلفات الناجمة عن التربة المكثفة للأنعام والزراعة المكثفة وتشييد نظم مياه المجاري التي تصرف

نظرة إجمالية/ البحار الساحلية في مشكلة[*]

- **تقتل المغذيات النباتية المنقولة بالأنهار من اليابسة مظاهر الحياة في أجزاء من البحار الضحلة حول العالم مؤدية إلى تشكل ما يدعى مناطق ميتة.**
- **تسبب المخصبات الكيميائية نموا زائدا للنباتات المجهرية الطافية قرب السطح، ما يحول دون وصول الضوء إلى النباتات القاطنة في القاع ويؤدي إلى زيادة كمية المواد العضوية المتعفنة الساقطة على قاع البحر. وتستهلك البكتيرات الموجودة قرب العضويات الميتة أكسجين القاع ما يؤدي إلى فقدان معظم الحياة الحيوانية هناك.**
- **يمكن استعادة تجديد هذه المنظومات البيئية المهمة بتخفيض ملحوظ في صبيب مياه الري ومياه الفضلات، وكذلك بضبط الصيد السمكي الجائر.**

(*) Overview/ Coastal Seas in Trouble

(1) جمع بكتيرة

في الكتل المائية، تؤدي جميعا إلى ازدياد كمية المغذيات في الأحواض المائية السطحية watersheds. وقد أشار تقرير **التقويم البيئي للألفية** The Millennium Ecosystem Assessment الصادر عن الأمم المتحدة في عام 2005 إلى أن كميات المركبات المحتوية على النتروجين الواصلة إلى البحار قد زادت بنحو 80 في المئة من عام 1860 إلى عام 1990. وتنبأ التقرير بأن مجمل الجريان نحو المحيطات نتيجة النشاطات البشرية سيزداد فوق ذلك بنسبة 65 في المئة بحلول منتصف القرن. ولذا يحتمل ازدياد انتشار المناطق الميتة ما لم تتخذ المجتمعات إجراء فوريا للإقلال من تدفق المغذيات النباتية.

مقابر مائية(*)

مع أن ظهور منطقة ميتة يعتبر المرحلة الأخيرة لسيرورة الإثراء الغذائي، فإن المنظومات البحرية، وبخاصة المجموعات الحيوانية منها، تتعرض لتغيرات قبل تلك الفترة بزمن طويل؛ إذ غالبا ما تشكل **الدياتومات (ثنائية الذرات)** diatoms - وهي **عوالق طحلبية سيليكاتية الغلاف** silica-shelled phytoplankton - أولى مراحل سلسلة غذائية سليمة في المناطق الساحلية. وهذه تستهلكها **مجدافيات الأقدام** copepodes، وهي **عوالق قشرية حيوانية متناهية في الصغر** minuscule zooplanktonic crustaceans. وتصبح هذه الحيوانات بدورها طعاما للأسماك. إن زيادة تراكيز المغذيات تؤثر في خليط أنواع العوالق النباتية، بحيث تفوق أنواع أخرى أدق وأقل قابلية للهضم أعداد العوالق الطحلبية. وعندما يتبع الإثراء الغذائي ازدياد العوالق النباتية بكثرة غالبا ما تعجز مجدافيات الأقدام عن الرعي على الأنواع الجديدة من العوالق النباتية وكذلك على الكميات الكبيرة من البقايا العضوية الناتجة من **اضطراب** disruption المنظومة البيئية الطبيعية. إن هذا التغير يشجع على نمو كائنات عضوية شديدة التحمل **كالهلاميات الليلية** noctiluca (المشكلة للفسفوريسين الليلي الحادث عند اضطراب سطح الماء)، ويدعو علماء الأحياء هذه الحيوانات السمكية الهلامية التي تشبه قناديل البحر «**الأنواع الحدية**» dead - end species، نظرا إلى صعوبة تعايش **المفترسات ذات المستوى الأعلى** higher - level predators قربها، كما أن وجودها يخفض من كفاءة **السلسلة الغذائية** food chain، ما يؤدي إلى تضاؤل المخزون السمكي.

إن الصيد الجائر يزيد في خلل توازن السلسلة الغذائية وبخاصة عندما يستهدف الأنواع العالية القيمة من **المفترسات القمة** top predators كأسماك **القد** cod والأسماك الفضية من نوع **النازلي** hake والأسماك الذهبية من نوع **دورادو** dorado والأسماك الخضراء المزرقة من نوع **الأسقمري** mackerel. إن فقدان أنواع **أسماك القمة** apex fish يقود إلى ازدياد أعداد طرائد **الأسماك الصغيرة** prey fish. وهذا بدوره يؤدي إلى تناقص أعداد العوالق الحيوانية (غذاء الأسماك الصغيرة)، ومن ثم إلى ازدياد العوالق النباتية. ويدعو العلماء هذه السيرورة المتتابعة **تهابط السلسلة الغذائية** trophic cascading. إن وجود سلسلة غذائية لاكفوءة يؤدي إلى ازدياد المادة العضوية على قاع البحر، وهذا بدوره يعزز خطر تشكل منطقة ميتة في وقت لاحق.

إن المنظومات البيئية التي تغيرت نتيجة الإثراء الغذائي تصبح أكثر عرضة لغزو أنواع دخيلة كتلك التي يمكن أن تصل مثلا نتيجة تصريف مياه أحواض توازن السفن العابرة للمحيطات. ففي الثمانينات وصلت أسماك **المشط الهلامية** Mnemiopsis leidyi، والتي ربما كانت أصلا على الساحل الشرقي للولايات المتحدة، إلى البحر الأسود. وقد طغت هذه المفترسات النهمة الحدية بحلول عام 1990 على كامل المنظومة البيئية، وبلغت في ذروتها كثافة هائلة وصلت إلى 5 كيلو غرام في المتر المربع.

وفي بعض الأحيان، يمكن لشعاب **الأسماك الصدفية** shellfish أن تدرأ تردي منظومة بيئية. ففي كثير من المصبات النهرية على الساحل الشرقي للولايات المتحدة يؤدي **المحار** oysters دور مهندسي النظام البيئي بالتجمع على شكل شعاب تعلو عدة أمتار فوق قاع البحر. وتدعم هذه الشعاب تجمعات متنوعة من الكائنات العضوية بما في ذلك **سمك موسى** flounder و**السمك القناص** snaper وأسماك **بيرج الفضية** silver perch **والسراطعين الزرقاء** blue crabs.

وعلى سبيل المثال، فقد بين كل من H> لينهان› [من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا] و H C> بيترسون› [من جامعة نورث كارولينا في شابل هل] أن ذرا شعاب المحار في نهر نوس بنورث كارولينا صارت ملاذا للأنواع المهجّرة من مناطق القاع الناضبة من الأكسجين عند بدء تشكل المنطقة الميتة، لأن تلك الذرا قد برزت فوق تلك المناطق. وعلى كل حال غالبا ما يؤدي الحصاد الميكانيكي المتكرر للمحار إلى الإقلال من ارتفاع هذه الشعاب، ما يساعد على تدمير **رجوعية** resilience هذه المنظومات البيئية.

كارثة البحر الأسود(**)

يقدم البحر الأسود مثالا صارخا على آلية تخريب **المنظومات البيئية القاعية** undersea ecosystems بفعل ازدياد المغذيات، كما يتيح تصورا عن كيفية إعادة إنعاش تلك المنظومات. لقد وقعت المنطقة الشمالية الغربية من البحر فريسة للإثراء الغذائي عندما تضاعفت كميات انصباب مركبات النتروجين والفسفور فيها من اليابسة بين أعوام الستينات والثمانينات. ويشكل نهر

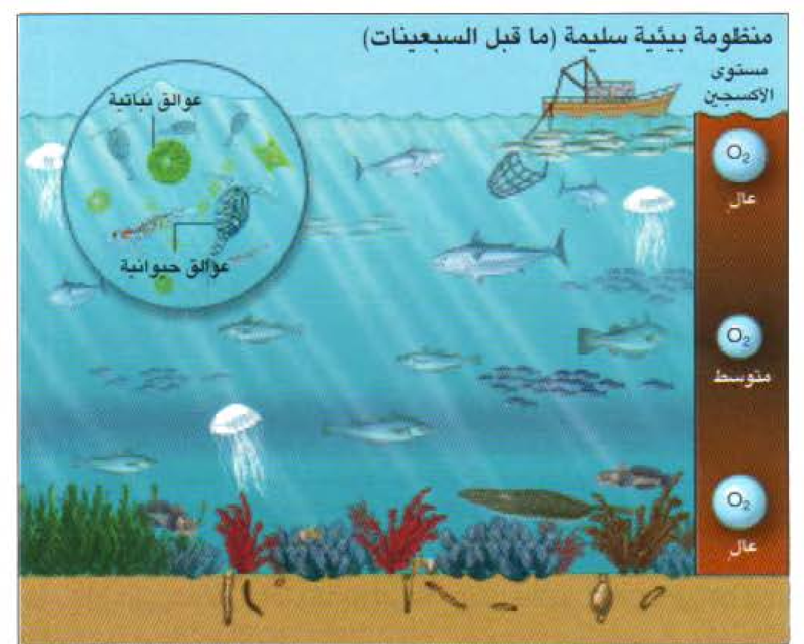


تظهر الحياة القاعية المفقودة والمستعادة بوضوح في هاتين الصورتين لموقعين من قاع البحر الأسود مطلع عام 2006. وتظهر *الصورة اليسرى* منطقة ناضبة بشدة مغطاة بقشريات الرخويات المقتولة نتيجة نقص الأكسجين المذاب. وفي *الصورة اليمنى* يظهر موقع متعاف مغطى بطبقة كثيفة من الطحالب المتنوعة وأعداد ضخمة من بخاخات البحر ascidians (نوافير بحرية **sea squirts**).

(*) Watery Graveyard
(**) Black Sea Catastrophe

المراحل الرئيسية لتشكل منطقة ميتة(*)

تعتبر الحوادث المحددة لنشوء المنطقة الميتة في البحر الأسود نمطية لمناطق مشابهة ناضبة من الأكسجين (عائزة للأكسجين)، رغم اختلاف التفاصيل من حالة إلى أخرى. وفي الأساس يقود الإثراء الغذائي وصول كميات كبيرة من المغذيات التي تسبب نموا شديدا للطحالب ونباتات طافية أخرى ضوئية التمثيل، بشكل غير مباشر إلى العوز الأكسجيني وإلى نفوق النباتات والكائنات الحية التي في الأعماق. لقد عرض «ت. ناجاي» [من وكالة أبحاث صيد الأسماك اليابانية، والذي درس إحدى أول المناطق ذات العوز الأكسجيني المعروفة] وصفا أوليا للمراحل الثلاث **لانحطاط** decline المنظومة البيئية في بحر سيتو الداخلي باليابان أوائل الستينات. فقد دعا المرحلة الطبيعية بـ**بحر السرب الأحمر** sea of red bream (أنواع المفترسات المستهدفة من الصيادين المحليين)؛ ثم تلت ذلك مرحلة **بحر الأنشوقبز** sea of anchovies، حيث تضاءل عدد المفترسات تاركة وراءها بشكل رئيسي **أسماك الطرائد الصغيرة** prey fish. وأخيرا أتت مرحلة **بحر السمك الهلامي (أو قناديل البحر)** sea of jelly fish، حيث كانت معظم الأنواع الأخرى تاركة وراءها أنواعا غازية شديدة التحمل تطغى في المكان. وقد كان «ناجاي» أيضا من بين أوائل الذين أشاروا إلى إسهام الصيد الجائر في سيرورة تدهور السلسلة الغذائية في البحر (نتيجة زوال السمك المفترس القمة).



في البدء احتوت المياه الساحلية القريبة من السطح في منطقة البحر الأسود الشمالية الغربية على خليط متنوع من العوالق النباتية (طحالب ونباتات ميكروية (مجهرية) أخرى طافية) وأنواع عديدة من السمك والمتعضيات الأخرى. وقد تميزت المياه الضحلة قرب الساحل بوجود أنواع من أسماك الأنشوقبز اليافعة، كأسماك الأذكيل mackerel والبونيتو bonito؛ في حين عاشت في الأعماق المتوسطة مجموعات كبيرة من المفترسات القمة كسمك الوايتنك whiting وأنواع كثيرة من الطرائد السمكية، إضافة إلى بعض قناديل البحر. أما في الأعماق فقد نشطت مجاميع من الرخويات وأسماك الجوبيز gobies و التربوت turbot و السترجيون sturgeon والسراطين hermit crabs، وذلك ضمن كميات هائلة من الأعشاب البحرية والطحالب البنية والحمراء.

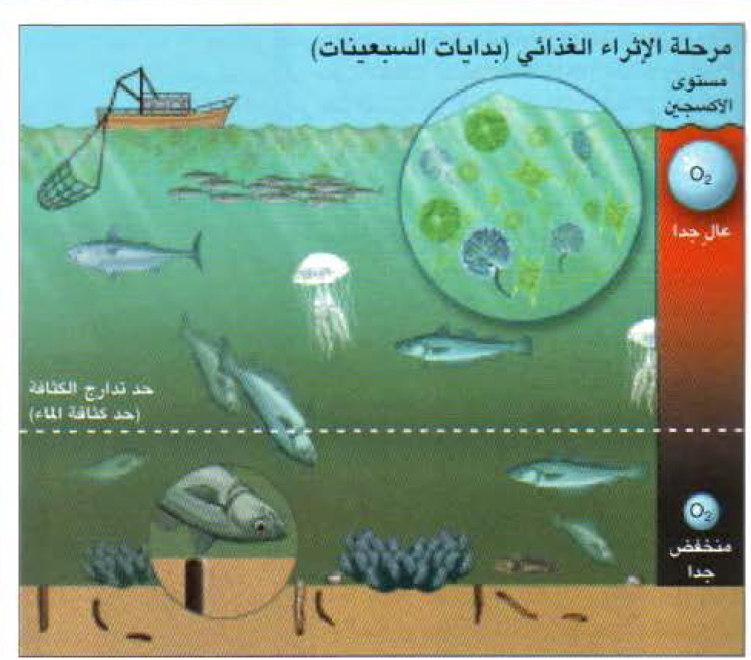
الدانوب المورد الرئيسي لهذه المركبات الكيميائية، نظرا إلى أنه يصرِّف معظم **تجمعات الأمطار** watersheds في 11 دولة عبر أوروبا الوسطى من ألمانيا إلى رومانيا. وتوجه أصابع الاتهام بشكل رئيسي نحو الصرف السطحي الزراعي ومياه الفضلات البلدية والصناعية، إضافة إلى مركبات النتروجين المنتقلة من الغلاف الجوي. إن ما لا يقل عن نصف كمية النتروجين الإضافية التي تصب في البحر الأسود نتج من أساليب الزراعة الحديثة، بما في ذلك الاستخدام المفرط للأسمدة، وكذلك بسبب منشآت الإنتاج الحيواني الضخمة. لقد أسهمت هذه النشاطات الزراعية أيضا في ازدياد صبيب الفسفور. ولكن الدور الأكثر تأثيرا كان لصبيب المخلفات الصناعية والبلدية المحملة **بالمذيبات المتعددة الفسفات** polyphosphate detergents.

لقد كانت المنطقة الشمالية الغربية الضحلة من البحر الأسود قبل الستينات تشكل نظاما متنوعا وعالي الإنتاجية، محتويا على امتدادات شاطئية شاسعة من الطحالب القاعية البنيّة اللون، كما عاشت بعيدا عن الشاطئ أكبر مجموعات الطحالب الحمراء في العالم ــ حقل من **الفيلوفورا** phyllophora بمساحة هولندا. وقد تعايشت هذه المروج الطحلبية الطبيعية مع مجاميع هائلة من الرخويات والمصراعيات الأخرى. وساعد مجمل هذا النظام على وجود أنواع كثيرة من اللافقاريات والأسماك. كما ساعدت الطحالب على أكسدة مياه القاع وقامت الرخويات بترشيح مياه البحر مؤمنة بذلك الضوء اللازم لسيرورة التمثيل الضوئي. وقد كانت هذه المنظومة البيئية العالية الرجوعية قادرة على استيعاب تغيرات كبيرة في ظروف المناخ والاضطرابات الطبيعية. وعلى كل حال فقد أدى ازدياد صبيب المغذيات إلى ظهور طفرات من العوالق النباتية على سطح الماء، وتسبب هذا النمو الوافر في تخفيض شفافية الماء، ما حال بدوره دون وصول الضوء إلى الطحالب القاعية، وأدى أخيرا إلى زوالها، ومن ثم تغيير المنظومة البيئية بأكملها.

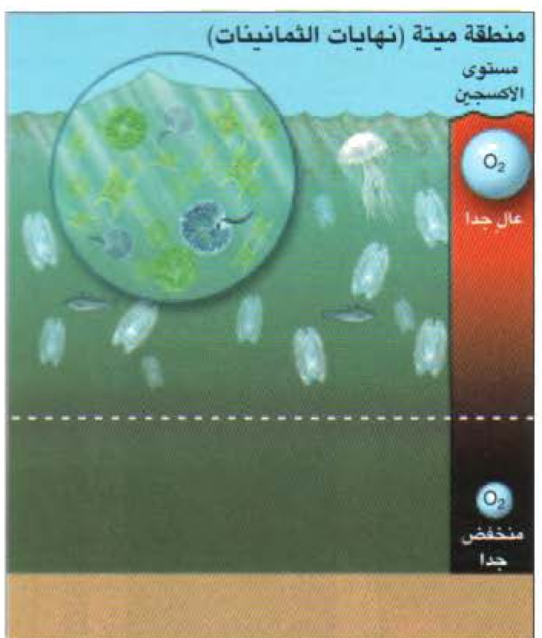
وخلال أشهر الصيف، حيث **تتنضد (تتراصف)** stratified طبقة المياه، تبدأ مستويات الأكسجين بالتناقص وبخاصة قرب القاع. ويتحمل كثير من المصراعيات العوز الأكسجيني لفترة قد تصل إلى 20 يوما، وذلك بإغلاق أصدافها والعيش على الاحتياطيات الداخلية من **الكليكوجين** glycogen ـ مخزون الطاقة الرئيسي للحيوان من الكربوهدرات. لكن حين استنزاف هذه المؤونة تنفق **الحلزونيات** mollusks بكميات كبيرة، ما يدفع البكتيرات والمتعضيات الأخرى لاستهلاك المتبقي من الأكسجين المحلي خلال تفكيكها لهذه الحيوانات النافقة وطرح كميات جديدة من المغذيات النباتية. وبزوال كامل الأكسجين، فإن كافة الكائنات الحيوانية التي كانت تعيش طبيعيا في المنطقة إما هاجرت بعيدا بحثا عن الغذاء والأكسجين وإما نفقت في مكانها.

ولم تبدأ المنطقة بالتعافي إلا بعدما انهارت الأنظمة الشيوعية في أوروبا الشرقية بنهاية عام 1989 وتم التخلي عن التخطيط المركزي للاقتصاد. ووجد المزارعون هناك أنفسهم بشكل مفاجئ

(*) KEY STAGES IN THE FORMATION OF A DEAD ZONE



مع تزايد صبيب المغذيات النتروجينية والفسفورية من اليابسة بدأ الاتساق الطبيعي للمنطقة الساحلية للبحر الأسود بالتغير. فقد أدى النمو الزائد للعوالق النباتية إلى تغير لون المياه إلى اللون الأخضر وحتى البني، ما حال دون وصول ضوء الشمس إلى النباتات العائشة في الأسفل، إضافة إلى ترسيب مستمر للمادة العضوية المتعفنة فوق القاع. وقد تلا ذلك قيام البكتيرات الموجودة على القاع باستهلاك كميات كبيرة من الأكسجين خلال التهامها المادة العضوية والنباتات النافقة، وهذا أدى إلى حالة عوز أكسجيني عند قاع البحر ونفوق متعضيات[1] كثيرة.



وأخيرا صار البحر خاليا من مظاهر الحياة، نظرا إلى امتداد الظل shading والعوز الأكسجيني الشامل. لقد أدى الصيد الجائر إلى تناقص أنواع الأسماك المفترسة، وأخيرا اختفاء هذه الأنواع ومعظم الحيوانات الكبيرة من المنطقة. ونتيجة لذلك تضاعفت كثير في الطبقات العلوية أنواع انتهازية غازية وبخاصة أسماك المشط الهلامية Mnemiopsis leidyi

بالقليل من المال لشراء السماد، ومن ثم تباطأت النشاطات الزراعية. كما أغلق الكثير من المزارع الحيوانية العملاقة، ما أدى لتخفيض جريان المغذيات إلى حد كبير. وقد أنتجت في السابق مزرعة واحدة تحوي مليون رأس من الخنازير في رومانيا ما يكافئ انبعاثات من مدينة يقطنها خمسة ملايين نسمة.

لقد نتج من التخفيض الكبير للمغذيات خلال ست سنوات تضاؤل مساحة المنطقة الميتة (*انظر الشكل في الصفحة 42*). وعلى كل حال كان تعافي البحر تدريجيا. فعلى سبيل المثال، أظهرت دراسات قام بها زملاء أوكرانيون أن تجمعات الرخويات في المناطق المخربة من الحيد الشمالي لم تعد إلى الظهور ثانية إلا بحلول عام 2002، أي بعد انقضاء سنين عديدة على تعافي مجموعات أخرى. وقد كشفت بعثة علمية أرسلناها في الشهر 2006/8 لفحص حالة البحر عن نمو كميات كبيرة من مجاميع الطحالب القاعية، رغم اختلاف هذه الأنواع عن تلك التي كانت سائدة قبل تشكل المنطقة الميتة.

طريق طويل للتعافي[*]

من الواضح أن استعادة الحياة في المناطق الميتة تتطلب في حدها الأدنى الإقلال من وصول المغذيات من الأراضي المجاورة. ومع ذلك قد لا تعود المنظومات البيئية البحرية التي انهارت بسبب الإثراء الغذائي والعوز الأكسجيني إلى وضعها الأصلي حتى لو غير الناس فعالياتهم لإقلال كميات المغذيات النباتية الواصلة إلى الأنهار. وتحصل هذه المقاومة للتعافي نتيجة ثلاثة أسباب.

فالأحواض النهرية الساكنة تمتلك إمكانات كبيرة لتخزين المغذيات - ذائبة في المياه الجوفية أو **ممتزة** adsorbed على ذرات التربة. وقد تنقضي سنين أو حتى عقود قبل توقف الأسمدة النتروجينية والفسفورية والمواد الكيميائية الأخرى عن **التسرب** leaching out والوصول إلى البحر، وتنزع مركبات النتروجين بشكل خاص إلى التراكم في المياه الجوفية.

كذلك قد **تتباطأ** linger المناطق الميتة في مواقعها إذا قل وجود مجموعات سليمة من النباتات والحيوانات في الجوار والتي يمكنها أن تقدم «**مخزونا بذريا**» seed stock بعيد وجود المجموعات المفقودة. وبالفعل فقد انقرضت أصناف **الحياتين النباتية والحيوانية** flora and fauna التي عاشت يوما في المنطقة المتضررة. ويمكن أن تنتقل حيوانات بحرية كانت تسكن الموقع مسافات كبيرة على شكل يرقات من منظومات بيئية سليمة لتوطن نفسها في ملاذ حيوي شاغر مناسب. وقد تجد هذه الأنواع التي تنوي العودة ثانية، نفسها قد احتلت مكانها متعضيات غازية انتهازية قامت بالاستيلاء على المواطن المناسبة.

وأخيرا غالبا ما يسبب الإثراء الغذائي تغيرات في تركيب المنظومة البيئية لا يسهل عكسها (*انظر الشكل في الصفحة 44*). وتتراجع بعض الأنواع لدى التزايد المبكر في تراكيز المغذيات، لكن يمكن أن تبقى المنظومة البيئية ككل فتية لفترة طويلة لما تمكنت المجموعات الطبيعية من مقاومة الازدياد في نمو العوالق النباتية أو ما يشبهها. ولكن

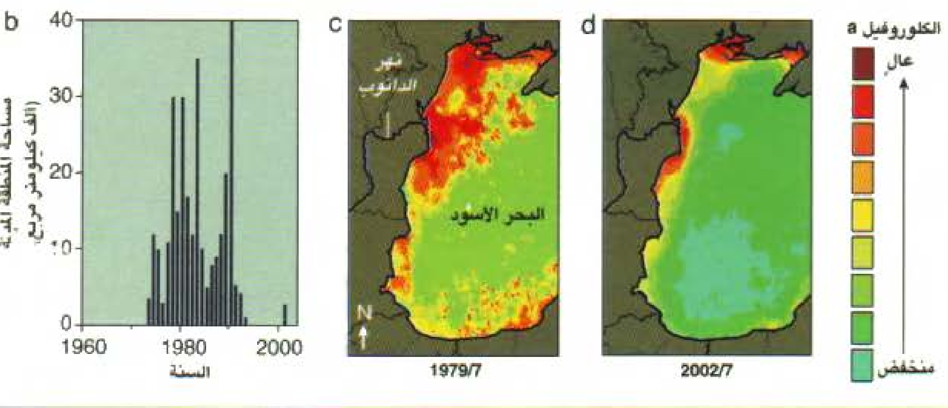
(*) Long Road to Recovery

(1) organisms، أو عضويات أو كائنات حية.

البحر الأسود يتعافى من جديد[*]

يؤكد تعافي المنطقة الميتة في البحر الأسود الحاجة إلى إنقاص جريان المغذيات الزراعية ومياه الفضلات والأنواع الأخرى من اليابسة إذا أريد استعادة المناطق المتأثرة لحياتها مرة ثانية. ولم تبدأ المنطقة الميتة المحاذية للساحل الشمالي الغربي للبحر الأسود بالتعافي إلا بعد انهيار النظام الشيوعي في عام 1989؛ حيث توقفت الزراعة المكثفة، بما في ذلك تربية الحيوانات على نطاق واسع والاستخدام الشديد للأسمدة المحتوية على النتروجين والفسفور (a) الذي كان سائدا منذ عام 1960. وقد شقت بقايا المغذيات طريقها إلى نهر الدانوب والأحواض الساكبة[1] الأخرى، ووصلت أخيرا إلى البحر الأسود، ما أدى إلى ظهور المنطقة الميتة في عام 1973 وتكرار حدوثها في فصول الصيف للسنين الواحدة والعشرين التالية (b). ويكشف اللون الأحمر بوضوح في صورة فضائية أخذت عام 1979 (c) امتدادا واسعا للمياه المثقلة بالأسمدة (في تلك الصورة وفي d تم تقدير الإثراء الغذائي بتعيين تراكيز الكلوروفيل a، وهو مؤشر إلى النمو النباتي في المياه السطحية).

وبعد مرور خمس سنوات على توقف الزراعة المكثفة عادت المنطقة المتردية إلى الحياة (d، b)، منتكسة مرة واحدة خلال الصيف الحار جدا عام 2001 وبحلول عام 2002 عادت مجموعات الرخويات إلى الاستيطان من جديد. وعلى كل حال يمكن أن يتعرض البحر الأسود لخطر جديد حين انطلاق اقتصادات أوروبا الوسطى وازدهار الزراعة مرة ثانية هناك.



فقدان الأنواع الرئيسية عند حد معين يؤدي إلى انهيار مفاجئ وحدوث حالة متردية جديدة تأخذ وضع توازن جديد نتيجة تحمل بعض الأنواع الباقية لتأثيرات الإثراء الغذائي ووصول كائنات انتهازية من مواقع أخرى. وهذه الحالة الجديدة هي، لسوء الحظ، في وضع مستقر. ولذا قد لا يؤدي إنقاص كمية المغذيات إلى مستويات ما قبل الإثراء الغذائي إلى استعادة المنظومة البيئية الأصلية، بل قد يلزم تخفيض تراكيز تلك المغذيات إلى مستويات أقل من ذلك بكثير.

ويزيد الصيد الجائر في تعقيد المسألة إذا أدى إلى الإقلال من رجوعية المنظومة البيئية، حيث يحصل تردي الحالة الطبيعية من وضعها الأصلي في وقت أبكر. ولذلك قد يكون من الضروري أيضا الإقلال من الصيد بشكل ملحوظ قبل التوصل إلى حالة سليمة. وقد يتعذر استعادة الظروف السابقة إطلاقا إذا فقدت أنواع المنظومة الأصلية أو ظهرت أنواع غازية في الموقع.

درء حدوث المناطق الميتة[**]

لا يكفي أن نعرف كيف نصلح المناطق الميتة، وإنما يجب على الحكومات أن تقتنع بأهمية استعادة هذه المناطق وتأخذ بزمام الأمور المبادرة لذلك. ولقد دعم العلماء بالوثائق بعضا من حالات التعافي لتلك المناطق، نظرا إلى أن إنقاص سيح runoff المغذيات من الأرض يتطلب تغييرات مهمة في أساليب الزراعة ومعالجة مياه الصرف. وقد أدت معظم البرامج الموضوعة إلى تخفيض جزئي فقط في جريانات المغذيات فوق الأرض.

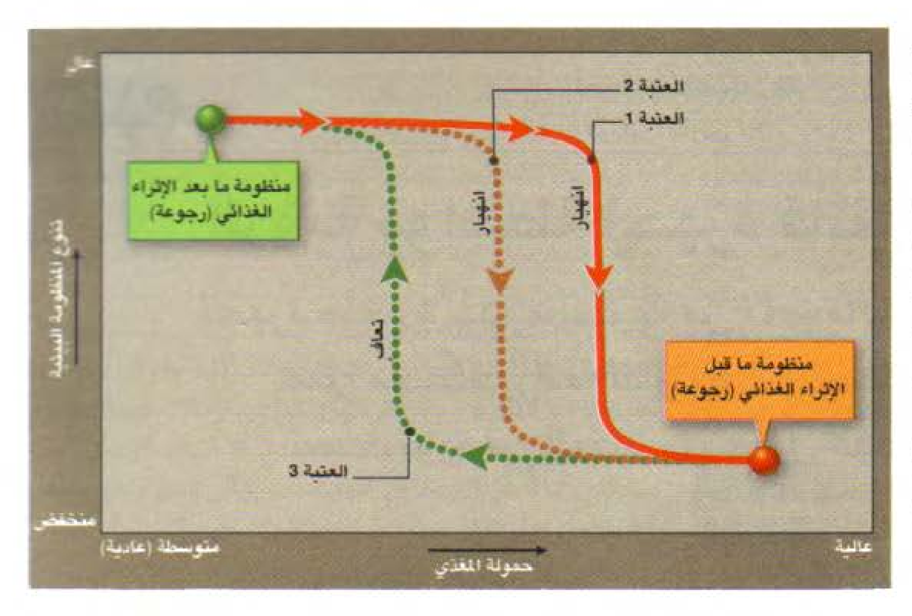
ولتخفيض حمولات المغذيات يجب وضع خطط شاملة (على مستوى منظومة حوض ساكب نهري) موضع التنفيذ للإبقاء على النتروجين والفسفور على اليابسة خارج الماء. وقد وضعت مثل هذه الجهود حاليا موضع التنفيذ في خليج جيزابيك وفي البحر الأسود. وفي الحالة الأخيرة اتفقت الحكومات المحيطة، بمساعدة **وحدة بيئة العالم** Global Environment Facility التابعة للأمم المتحدة، على اتخاذ مبادرة مهمة للإبقاء على مستويات جريان المغذيات عند قيمتها منتصف التسعينات، وهي خطة تساعد على ما يبدو على تعافي تلك المناطق من خلال مشاريع رائدة لتحسين أساليب الزراعة ومعالجة مياه الفضلات.

وعلى كل حال يجب التغلب على مشكلتين مهمتين قبل حدوث تعاف شامل ومستدام لمنظومة البحر الأسود البيئية. ويجب على السلطات الأوروبية اتخاذ الإجراءات اللازمة لضمان عدم وصول المغذيات من اليابسة إلى البحر مرة ثانية في حال عودة انطلاق اقتصاداتها من جديد. فمثلا يجب عليهم الاستثمار في مشاريع ضخمة للإقلال من الفضلات، وذلك باستخدام أحدث التقنيات. وتبرز أهمية هذه النقطة بشكل خاص في حوض الدانوب: حيث انضمت، أو في الطريق إلى ذلك، ست دول إلى الاتحاد الأوروبي. ويتلهف بعض المزارعين من أوروبا الغربية، حيث تسببت الزراعة المكثفة في إثراء غذائي للأنهار والمياه الساحلية، لشراء مزارع في أوروبا الوسطى.

كما يجب على الحكومات تحجيم الصيد السمكي التجاري إلى الحد الذي يسمح بتعافي المخزونات المستنزفة من **الأسماك المفترسة** Piscine Predators، وكذلك ضبط شباك وتجهيزات الصيد في القوارب التي تخرب المجموعات القاعية الرئيسية.

إن على الأمم البحرية عبر العالم العمل

(*) The Black Sea Comes Back
(**) Eliminating Dead Zones
(1) watersheds



قد لا يكفي تخفيض مستويات المغذيات إلى ما كانت عليه قبل تشكل المنطقة الميتة لتحقيق التعافي. كما هو مبين في هذا الشكل، الذي يربط بين صحة منظومة بيئية (بدلالة تعقيدها أو تعدد أنواعها) وكمية المغذيات التي تكفيها. وتبقى منظومة ما عالية التنوع ومقبولة الصبيب من المغذيات ذات رجوعية عالية إلى أن تزيد حمولة المغذيات على مستوى معين (*العتبة 1*)، مؤدية بذلك إلى انحدار المنظومة نحو حالة تنوع أدنى. وتحصل هذه الحالة المفاجئة (*العتبة 2*) إذا أدى الصيد الجائر إلى استنزاف أعداد الأسماك من المفترسات القمة[1]، ما ينقص تعدد الأنواع. ولسوء الحظ فإن الحالة المتردية الجديدة هي أيضا مقاومة للتغير ولا يمكنها استعادة تنوعها المفقود إلا عند انخفاض معدلات صبيب المغذيات إلى مستوى أقل بكثير من المستويات الابتدائية (*العتبة 3*). وحتى في هذه الحالة الأخيرة يمكن لمنظومة بيئية أن لا تعود مطلقا إلى حالتها الأولى إذا انقرضت الأنواع الرئيسية.

على تخفيف الضغط الذي يسببه الصيد في مناطق الإثراء الغذائي، وهذا الأمر يصعب تحقيقه بعد أن استنزفت اليوم أكثر من نصف المصايد السمكية عبر العالم. ورغم توقيع اتفاقية عالمية لتأسيس شبكة من المحميات البحرية عبر العالم ببلوغ عام 2012 ـ ما يساعد على تقييد الصيد الجائر وإنقاذ المخزون البذري اللازم لتعافي المناطق الميتة ـ فإنه من غير المتوقع تحقيق أهداف هذه الاتفاقية، نظرا إلى فقدان آليات التطبيق.

وحتى لو تمت استعادة جزئية لمنظومة **بيئية ثرية بالغذاء** eutrophic يجب على السلطات أن تدرك أن هذا التعافي الجزئي قد يبقيها في وضع لامستقر. فالرخويات، على سبيل المثال، لها قدرة فائقة على ترشيح المياه. وقد تم تنمية أسرةً من الرخويات على شعاب اصطناعية لتحسين جودة المياه. ولكن التفكيك البكتيري لفضلات الرخويات والكائنات النافقة يستهلك كميات كبيرة من الأكسجين، ما يؤدي إلى تشكل **دورات ذروة وحضيض** boom-and-bust cycles في الأمكنة التي يكون فيها خلط الماء ضعيفا وتجديد الأكسجين محدودا. وفي هذه الحالات تنهار مجموعات الرخويات النشيطة فجأة فتتشكل منطقة ميتة لا يبدأ تعافيها من جديد إلا بعد تفكك كامل المادة العضوية في الموقع. لقد لاحظ العلماء هذه الظاهرة في المصبات على البحر الأسود. ويكمن التحدي أمام مديري الموارد البحرية في الإبقاء على الظروف التي تسمح بديمومة منظومات **رجوعة** resilient ومتنوعة ـ حتى في المناطق التي لم يعد فيها بلوغ حالة التعافي التام ممكنا.

وبكلام أكثر دقة، يعتمد مبدأ تصنيف مستوى صحة أو جودة منظومة بيئية على القيم التي لدى السكان المحليين. ففي الوقت الذي يبدو لبعضهم أن النتيجة المطلوبة من أي **عمل تصحيحي** remedial action هي الوصول إلى بحر يحتوي على طرائد سمكية صغيرة، في حين لا يكون مقبولا لدى الآخرين إلا التوصل إلى حالة بحر يعج بالمفترسات الرئيسية.

إن المناطق الساحلية الميتة تنبهنا إلى أن على البشرية ألا تتوقع ببساطة أن تمتص المنظومة البيئية الطبيعية مخلفات البشر من دون أن يترتب على ذلك نتائج خطرة، غالبا ما تكون غير متوقعة. ونحن نعلم حاليا كيف نستعيد حياة المناطق الميتة، ولكن الخطوات اللازمة لفعل ذلك تعتمد في النهاية على مدى تقديرنا لتشعب مشكلات طرح النفايات في البيئة، وعلى درجة تقييمنا للمنظومات البيئية البحرية. ■

(1) top predators

المؤلف

Laurance Mee

مدير المعهد البحري في جامعة بلايموث بإنكلترا. وهو يرأس مجموعة أبحاث الخطة البحرية الساحلية المتعددة الاختصاصات في الجامعة. وهو عالم محيطات حصل على الدكتوراه من جامعة ليفربول. شغل «مي» أيضا مواقع بحثية في معهد العلوم البحرية والمائية في المكسيك ومختبر IAEA للبيئة البحرية في موناكو، ونسق أعمال برنامج وحدة بيئة العالم التابعة للأمم المتحدة ـ البرنامج البيئي للبحر الأسود. وقد صار زميل كرسي صون البحار في عام 1988 وتنصب أعمال «مي» الحالية على طرق حماية البيئة البحرية وأحواض الصرف المرتبطة بها والمناطق الساحلية.

مراجع للاستزادة

Marine Benthic Hypoxia: A Review of Its Ecological Effects and the Behavioral Responses of Benthic Macrofauna. R. J. Diaz and R. Rosenberg in *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, Vol. 33, pages 245–303; 1995.

National Estuarine Eutrophication Assessment: Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries. S. B. Bricker, C. G. Clement, D. E. Pirhalla, S. P. Orlando and D.R.G. Farrow. NOAA, National Ocean Service, Special Projects Office and the National Centers for Coastal Ocean Science, 1999.

Nutrient-Enhanced Productivity in the Northern Gulf of Mexico: Past, Present and Future. N. N. Rabelais, R. E. Turner, Q. Dortch, D. Justic, V. J. Bierman and W. J. Wiseman in *Hydrobiologia*, Vol. 475, No. 6, pages 39–63; 2002.

Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, 2005. Available online from **www.millenniumassessment.org/en/products.global.overview.aspx**

Restoring the Black Sea in Times of Uncertainty. L. D. Mee, J. Friedrich and M. T. Gomoiu in *Oceanography*, Vol. 18, pages 32–43; 2005.

Scientific American, November 2006

الرؤية بواسطة أجهزة فائقة الموصلية[*]

أجهزةٌ صغيرة جدا مصنوعة من مادة فائقة الموصلية، تعمل عمل مُحسّات رائعة للفوتونات ولجسيمات أخرى، تُحدث ثورة في العديد من حقول البحث والتقانة.

<K. D. إروين>

عيناك مكشافا ضوء شديدا الحساسية، تعينان شدة الأشعة الساقطة عليهما ولونها وتوزّعها الفضائي[1]. وتمتلك شبكية العين البشرية من العنصورات (البكسلات)[2] أكثر مما تمتلكه آلة تصوير رقمية تجارية. ففي الشبكية نحو ستة ملايين من الخلايا المخروطية التي تتحسس باللون وأكثر من 100 مليون من الخلايا الأسطوانية (القضبان) المسؤولة عن الرؤية في الظلام. والعيون حساسة جدا: خلية أسطوانية معتادة على الظلام يمكن أن تطلق إشارة إلى الدماغ عند امتصاصها جسيما واحدا من جسيمات الضوء (أو فوتونا)، وهو أصغر وحدة كمومية من موجة كهرمغنطيسية. وتلزم ستٌ فقط من إشارات الفوتون الواحد هذه لكي يرى الدماغ ومضة. لكن العيون وآلات التصوير التجارية بعيدة عن أن تكون مثالية للعديد من المهمات، لأنها لا تستطيع أن تكشف سوى تلك الفوتونات التي تقع تردداتها في المدى المرئي الضيق. وأكثر من ذلك فإن قدراتها اللونية لا تتضمن قياس التردد (التواتر) المضبوط لكل فوتون.

وبالمقابل، فإن مكاشيف الفوتونات، العلمية منها والصناعية، تحدّق في المجالات الكهرمغنطيسية التي تقع خارج مدى الضوء المرئي ـ فهي تنظر في عالم الأشعة تحت الحمراء والموجات الميكروية[3]، حيث الترددات (التواترات) منخفضة (الأطوال الموجية طويلة، الطاقة منخفضة)، وفي عالم الأشعة السينية وأشعة گاما حيث الترددات عالية. ولكنها هي الأخرى محدودة في قدراتها. ويفتقر العلماء بصورة خاصة، بالنسبة إلى الأطوال الموجية المرئية والأطول منها، إلى مكشاف قادر على «رؤية» فوتون منفرد وعلى تمييز تردده، ومن ثم طاقته، بأي دقة كانت؛ ذلك أن تعيين تردد الفوتونات يفتح الباب أمام ثروة من المعلومات حول المادة التي أصدرت هذه الفوتونات.

تنطلق حاليا ثورة في كشف الفوتونات بابتكار مكاشيف أساسها الموصلية الفائقة، بإمكانها القيام بمثل تلك القياسات الدقيقة وبأمور أخرى غير عادية؛ إذ إن هذه الأدوات الجديدة تحسّن حساسية القياسات على مدى الطيف الكهرمغنطيسي، من الموجات

(*) SEEING WITH SUPERCONDUCTORS

(1) spatial: أو الحيِّزي أو المكاني.

(2) البكسل pixel: هو «عنصر صورة»، وعنصورة نحت من هاتين الكلمتين.

(3) الموجة الميكروية microwave: هي إشعاع كهرمغنطيسي تقع أطوال موجاته بين مليمتر وعشرة سنتيمترات؛ و ـ micro : ميكروية (نسبة إلى الميكرون) أو ميكرونية أو ميكرونية أو صغرية. (التحرير)

يستطيع فوتون منفرد أن يمزق الآلاف مما يسمى أزواج كوبر من الإلكترونات الموجودة في مادة فائقة الموصلية. وبإمكان جيل جديد من المحسّات المبنية على هذا المبدأ كشف فوتون منفرد وتحديد طاقته بدقة كبيرة.

الراديوية إلى الضوء المرئي إلى أشعة گاما، تحسينا مذهلا. فالأجهزة المحسَّنة المخصصة لقياس استقطاب الموجات الميكروية سوف تسبر قريبا اللحظات الأولى للكون بواسطة قياس الشكل الذي طبعته موجات الثقالة[1] من الانفجار الأعظم على الخلفية الكونية من الموجات الميكروية. والمكاشيف القادرة على عدِّ فوتونات مرئية وحيدة تُحسِّن أمن الاتصالات الكمومية. وفي السنكروترونات صار هناك مكاشيف فائقة الموصلية للأشعة السينية تستخدم لدراسة التركيب الكيميائي للمواد. ويطور الباحثون مكاشيف أشعة گاما بإمكانها القيام بعمل أكثر تميزا لتحديد هوية المواد النووية بغية منع سرقتها أو تهريبها عبر الحدود الدولية.

كذلك تتحسس الأجهزة الفائقة الموصلية، عدا كشفها الفوتونات، البوليميرات البيولوجية وتتقصى الجسيمات المتأثرة تأثرا ضعيفا التي تشكل المادة الخفية الغامضة المؤلِّفة خمسة أسداس المادة في الكون. فالمكاشيف الفائقة الموصلية لاتزال في بداية تحقيق إمكاناتها العلمية والتجارية.

هشاشة مفيدة[*]

من الغريب حقا أن تكون خاصة الموصلات الفائقة التي حدَّت من استخدامها في تطبيقات مثل نقل القدرة الكهربائية هي بالضبط الميزة التي تجعلها قيِّمة بمثابة مكاشيف فوتونات. فالموصلية الفائقة، التي هي سريان التيار الكهربي من دون مقاومة، تنشأ حين ترتبط الإلكترونات في مادة مناسبة بعضها ببعض لتشكل ما يسمى **أزواج كوبر** Cooper pairs التي تسري عندئذ ككل، مثل مائع فائق. **وهناك تأثير ميكانيكي كمومي هش مفاده أن الموصلية الفائقة لا تحدث في المادة إلا حين تُبرَّد هذه المادة إلى ما دون درجة حرارة منخفضة جدا، تدعى حرارة التحول الحرجة لهذه المادة. وتبريد المادة يُنقص اهتزازات ذراتها. فإذا ارتفعت درجة الحرارة فوق حرارة العتبة (المبدى) threshold أبعدت الطاقة الحرارية للتصادمات الاهتزازية الإلكترونين الشريكين في أزواج كوبر** أحدهما عن الآخر وأزالت بذلك الموصلية الفائقة.

وبسبب هذه الحساسية للحرارة لا بد من تبريد العديد من الموصلات الفائقة إلى درجات قليلة فقط فوق الصفر المطلق (درجة 0 كلفن تساوي 273.15- درجة سلزية أو 459.69- درجة فهرنهايت). وتحتاج بعض الأنواع إلى درجات حرارة منخفضة لا تتجاوز أجزاء قليلة من المئة من الكلفن. ويمكن التوصل إلى هذه الدرجات المنخفضة جدا من الحرارة باستخدام مبرِّدات متوافرة تجاريا تستخدم إما الهليوم السائل أو سيرورة تدعى **إزالة المغنطة الكظوم (الأدياباتية)**[2] adiabatic demagnetization. إلا أن الحاجة إلى مثل هذا التبريد تحظر العديد من التطبيقات. وعلى مدى سنين ناضل العلماء من أجل تطوير مواد ذات موصلية فائقة أكثر ثباتا وتبقى كذلك عند درجات حرارة أعلى.

ولكن هشاشة الموصلية الفائقة بحد ذاتها هي الصفة التي تجعلها مناسبة بصورة مثالية للاستخدام في المكاشيف الحساسة. وتعتمد مكاشيف الفوتونات الفائقة الموصلية على مقدرة طاقة فوتون منفرد على تمزيق[3] الآلاف من أزواج كوبر. عندئذ يمكن قياس التغير في حالة الموصلية الفائقة بعدة طرق بغية الكشف عن الطاقة التي أعطاها الفوتون. ولما كانت طاقة الفوتون متناسبة مع تردده، فإن هذا القياس يدل كذلك على تردد الفوتون، وهذا هو المفتاح للحصول على معلومات عن الجسم الذي أتى الفوتون منه.

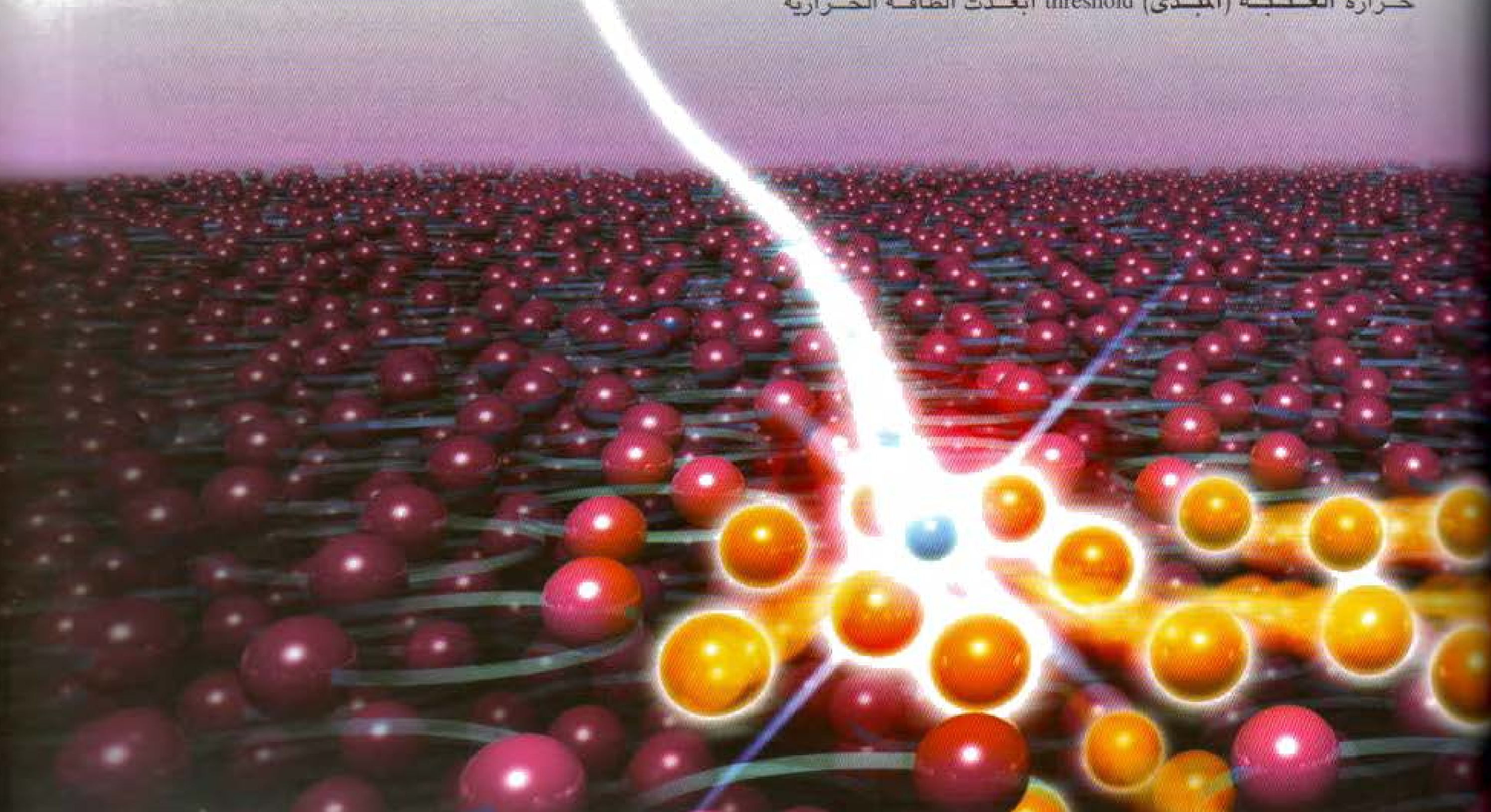
(*) Useful Fragility

(1) gravity waves

(2) adiabatic: صفة تطلق على كل سيرورة تحدث في نظام حراري لا يصحبها تغير في درجة الحرارة.

(3) disruption

(التحرير)



إن المكاشيف شبه الموصلة العاملة عند درجة الحرارة العادية، مثل **الأجهزة ذات الشحنات المقترنة** charge-coupled devices (CCD) الموجودة في آلة تصوير رقمية، تعمل هي الأخرى بواسطة تشويش حالة كمومية في المادة. ففي حالة الجهاز CCD يصدم فوتون الضوء المرئي إلكترونا فيخرجه من نطاق طاقة في بلورة شبه موصلة ولكن الإلكترونات مرتبطة ارتباطا قويا في هذه النطاقات، لدرجة أن كل فوتون لا يحرر عادة سوى إلكترون واحد. وهذا التحرير قليل جدا لدرجة أنه لا يكفي لتحديد تردد الفوتون. ونتيجة لذلك لا يستطيع الجهاز CCD تعيين لون الفوتون مباشرة - أما آلات التصوير الرقمية فتشكّل صورا ملونة باستخدامها جملة مرشحات، أحدها أحمر والآخر أخضر والثالث أزرق، لا تمرر سوى الفوتونات التي تقع تردداتها في هذه المجالات.

وعلى النقيض من ذلك، فإن بإمكان فوتون مرئي واحد فصل[1] الآلاف من أزواج كوبر في الموصل الفائق. ويتيح تكوين آلاف الإثارات قياس الطاقة قياسا دقيقا، مثلما هو الأمر بالنسبة إلى استطلاع الرأي في الانتخابات الذي يكون أكثر دقة إذا استطلع رأي الألوف من الناس.

وتصنف المكاشيف التي تعمل على تحسس تمزق الموصلية الفائقة في صنفين رئيسيين. النوع الحراري الذي يبرد حتى درجة حرارته الانتقالية بالضبط، وعندها لا يكون إلا جزئيا في حالة الموصلية الفائقة وتكون الإثارات الحرارية على وشك أن تخرب الموصلية الفائقة كليا. وأي طاقة تودع في الموصل الفائق ترفع درجة حرارته وتسبب ارتفاع مقاومته الكهربائية ارتفاعا ملموسا. أما النوع الآخر، المكشاف **الفاصل للأزواج** pair-breaking فهو على العكس من ذلك، إذ يبرّد إلى درجة حرارة أخفض كثيرا من درجة حرارة الانتقال ويكون في حالة الموصلية الفائقة كليا. ويقيس هذا المكشاف عدد أزواج كوبر التي تحطمت عند إبداع الطاقة فيه.

ويجب كذلك ذكر نوع آخر من أجهزة الموصلية الفائقة بغية استكمال الموضوع يعمل «**المازج، الفائق الموصلية**» superconducting "mixer" مثل مضخم للإشارات الكهرمغنطيسية المنخفضة التردد مثل الموجات الميكروية. ولما كانت هذه الأجهزة لا تستخدم هشاشة الموصلية الفائقة فلا داعي للحديث عنها أكثر من ذلك في هذه المقالة.

يعتمد النوع الحراري من المكاشيف على حقيقة أن المقاومة الكهربائية للموصل الفائق ترتفع بشكل حاد من الصفر إلى قيمتها الاعتيادية في المدى الضيق جدا من درجة الحرارة الذي تتحول فيه المادة من حالتها الفائقة الموصلية إلى حالتها العادية [*انظر الإطار في الصفحة المقابلة*]. ويتيح التغير الفجائي في المقاومة للموصل الفائق أن يعمل عمل ميزان حرارة بالغ الحساسية. ويدعى المكشاف الذي يستخدم الانتقال الطوري الفائق الموصلية بهذه الطريقة **محسًا ذا حافة انتقالية** transition-edge sensor (TES). فحين يمتص المحسّ TES فوتونا تتحول طاقة الفوتون إلى طاقة حرارية ترفع درجة الحرارة ومن ثم تزيد مقاومة المادة بصورة متناسبة مع الطاقة المودعة. ويمكن، تبعا للمادة التي تمتص الفوتونات، أن يُستخدم المحسّ TES مثل مقياس طيف لقياس طاقة الأشعة السينية والأشعة گاما أو مثل عداد فوتونات عند الأطوال الموجية تحت الحمراء، حتى المرئية أو مثل مكشاف قدرة إجمالية للإشعاع عند نُطق الموجات تحت الحمراء والمليمترية.

هشاشة الموصلية الفائقة هي الصفة التي تجعلها ملائمة بصورة مثالية للمكاشيف الحساسة.

تم تطوير أوائل المكاشيف TES في الأربعينات لكنها لم تكن عملية على مدار سنين عديدة. وكانت المشكلة في أن مدى الانتقال إلى الموصلية الفائقة غالبا ما يكون أقل من جزء من ألف من الدرجة، ولذلك كان من العسير جدا إبقاء درجة حرارة الجهاز ضمن هذا المدى. وحين كنت طالب دراسات عليا مع <B. كابيرا> [في جامعة ستانفورد]، كانت مجموعتنا البحثية تطور صفيفات من المكاشيف TES لإجراء تجارب تهدف إلى دراسة النيوترينوهات الصادرة عن المفاعلات النووية وإلى كشف المادة الخفية. وقد تمكّنا من الحصول على عدد قليل من المكاشيف TES، ولكن تغيرات ضئيلة في درجة حرارة الانتقال لمختلف المحسات جعلت تشغيل صفيف منها عند درجة الحرارة ذاتها أمرا مستحيلا.

وفي عام 1993، أدركتُ أن حيلة بسيطة يمكن أن تحل هذه المشكلة - هي تطبيق فلطية ثابتة على المكاشيف، وهي تقنية تدعى **انحياز الفلطية** voltage biasing. تؤدي الفلطية المطبقة إلى مرور تيار كهربي عبر المكاشيف TES، وهذا يسخنها. وعند بلوغ درجة حرارة الانتقال ترتفع المقاومة، وهذا يُنقص التيار ويوقف التسخين. وهكذا يعمل التسخين الذاتي عمل **ارتجاع**[2] feedback سالب يعمل على إبقاء درجة حرارة الغشاء ضمن مجاله الانتقالي. ففي صفيف من المحسات المنحازة فلطيا يسخن كل محس ذاتيا حتى بلوغ درجة حرارته الانتقالية، حتى إن اختلفت درجات الحرارة الانتقالية عن بعضها قليلا. كما أن الارتجاع السلبي يسرّع استجابة المكاشيف. وقد أدى إدخال

نظرة إجمالية/ المكاشيف الفائقة الموصلية[*]

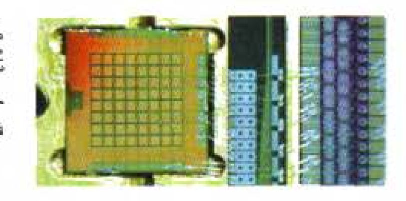
- **إن المحسات القادرة على كشف جسيم منفرد من الضوء (فوتون) وتعيين طاقته أو على قياس إشارة فوتونات عديدة بصورة حساسة، لها تطبيقات علمية وتقانية لا تعد ولاتحصى، من بينها تطبيقات في: الأمن الوطني (كشف مواد يمكن أن تستخدم في سلاح نووي)، تحليل عيوب الشيبات الميكروية، الفلك، التحليل الكيميائي وفيزياء الجسيمات.**
- **هناك جيل ثوري جديد من هذه المحسّات مبني على خصائص الموصلات الفائقة وباستطاعة هذه المحسات قياس طاقة الفوتون بدقة عالية جدا، كما تتيح المحسّات الجديدة تشكيل الصور بسرعة كبيرة جدا.**
- **المكاشيف الجديدة نوعان. يعتمد النوع المسمى محسات حرارية على الكيفية التي تعمل بها طاقة الفوتون لترفع درجة حرارة مادة المكشاف. والنوع الآخر، المسمى مكاشيف فصل (تحطيم) الأزواج، يحس كيف يمزّق الفوتون بعض أزواج الإلكترونات المسببة للموصلية الفائقة.**

(*) Overview/ Superconducting detectors

(1) breaking، أو تحطيم.

(2) أو تغذية راجعة، أو تلقيم مرتد. (التحرير)

كيف يكشف موصل فائق الضوء[*]



مكاشيف الفوتونات الفائقة الموصلية نوعان رئيسيان، نوع حراري ونوع فاصل (محطم) للأزواج. وفي كلا النوعين تُعيِن طاقة الفوتون (ومن ثم تردده) من شدة إشارة خرج الجهاز. في *أقصى اليمين* صفيف من 64 عنصورة لمحس حراري يُستخدم في الوقت نفسه آلة تصوير بالأشعة السينية ومقياس طيف عالي الميز للأشعة السينية. أما الدارة في الجانب الأيمن من الصورة فهي سكويد **مُضاعف القنوات** multiplexer (وصفه في *الأسفل*)

المكاشيف الحرارية

أكثر أنواع المكاشيف الحرارية الفائقة الموصلية هو **المحس ذو الحافة الانتقالية** transition-edge sensor الذي يُبرَّد إلى منتصف مدى درجات الحرارة الضيق جدا الذي تتغير فيه مادته الفعالة من فائقة الموصلية إلى عادية (*المخطط العلوي*). وتعمل فلطية انحياز على بقائه مستقرا عند درجة الحرارة الانتقالية تلك وعلى سريان تيار كهربي ثابت. وعند امتصاص المحسُ فوتونا فإنه يسخن قليلا مدة قصيرة (*المخطط السفلي*)، وهذا يؤدي إلى زيادة ذات شأن في مقاومة المحسُ. ويقوم جهاز فائق الموصلية، يسمى السكويد، بكشف الهبوط اللحظي في التيار ويحوِّل هذه الإشارة إلى نبضة فلطية يمكن تضخيمها فيما بعد بواسطة الإلكترونيات المعتادة، وذلك قبل جمع البيانات.

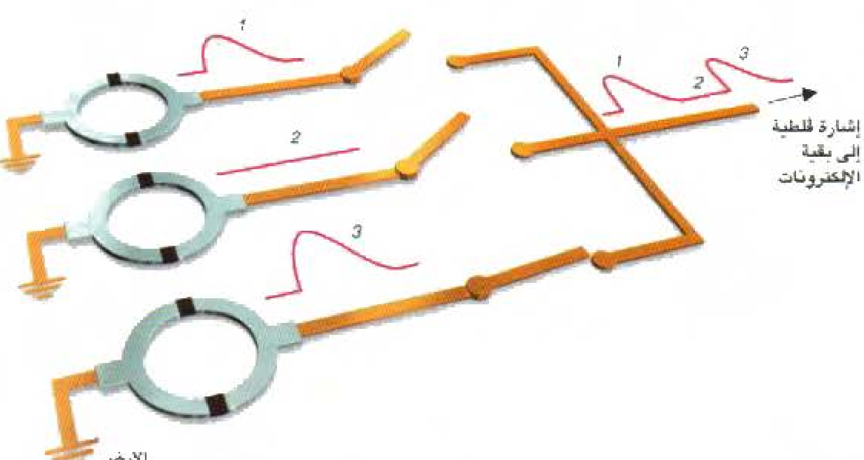


مكاشيف فاصلة للأزواج

يبرَّد النوع الآخر من المحسات كليا إلى طوره الفائق الموصلية الذي تشكل فيه إلكتروناته أزواج كوبر. يمتلك فوتون منفرد طاقة كافية لتمزيق الآلاف من أزواج كوبر، فتحطمها وتحولها إلى إلكترونات مثارة تعرف بأشباه الجسيمات (*الشكل الأيسر*). ومع أن المادة تبقى فائقة الموصلية، فمن الممكن كشف أشباه الجسيمات لأنها، بخلاف أزواج كوبر، تستطيع العبور نفقيا عبر الحاجز العازل فتنتج نبضة شحنة تمرَّر إلى الإلكترونيات المعتادة (*الشكل الأيمن*).

إرسال صورة بواسطة مضاعفة[1] القنوات

يتم تشكيل الصورة بواسطة صفيفات كبيرة من المكاشيف، لكن جميع إشارات الخرج الآنية من المكاشيف يجب أن توحَّد في عدد أصغر من خطوط البيانات، وهذه سيرورة تعرف **بمضاعفة القنوات** multiplexing. فعلى سبيل المثال، توصل مخارج عدد من السكويدات إلى خط بيانات واحد، فيما تسمى مضاعفة القنوات بتقسيم الزمن، إلى المحسات ذات الحافة الانتقالية. وتعمل السكويدات عمل مبدِّلات تغلق بالتتابع واحدا إثر آخر فتحول شكل إشارات المكشاف (1-3) إلى متتالية من النبضات. وتقوم الإلكترونيات فيما بعد بتحديد أي نبضات تخص كل مكشاف بواسطة التوقيت الدقيق.



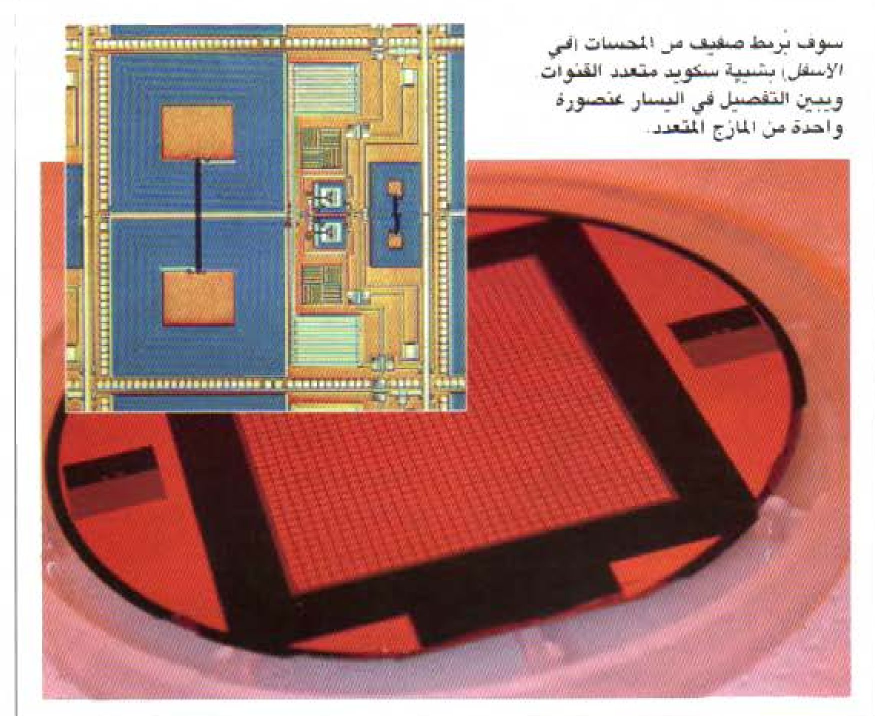
(1) أو تضميم، أو تعددية

(*) HOW A SUPERCONDUCTOR DETECTS LIGHT

الفلك دون المليمتري(*)



تتيح الأرصاد الفلكية عند أطوال موجية أقصر قليلا من المليمتر دراسة مناطق داخل السحب الجزيئية تكون مخفية عند أطوال موجية أخرى فمثل هذه السحب تقوم بدور مهم في مناطق تشكل الكواكب والنجوم والمجرّات. وسوف يصبح تناول هذا المدى المستعصي من الأطوال الموجية أكثر سهولة بكثير مع تطوير آلة التصوير SCUBA-2 التي سوف تركّب في مقراب جيمس كليرك ماكسويل (في اليمين) على قمة مونا كيا Mauna Kea في هاواي في عام 2007. وتحوي آلة التصوير ثمانية صفيفات في كل منها 1280 محسا ذا حافة انتقالية.



سوف يُربط صفيف من المحسات (في الأسفل) بشيبة سكويد متعدد القنوات. ويبين التفصيل في اليسار عنصورة واحدة من المازج المتعدد.

انحياز القلطية إلى نمو هائل في تطوير صفيفات المكاشيف TES في العالم كله.

عدّ أشباه الجسيمات(**)

لا يمكن للمكشاف الفاصل للأزواج أن يعتمد على التغير في المقاومة الكهربائية لكي يعطي إشارة امتصاص فوتون. بخلاف المحس الحراري، فالفوتون الوارد يحطم أزواج كوبر ويكوّن أشباه جسيمات يمكن اعتبارها، لمعظم الأغراض، بمثابة إلكترونات حرة في مادة أخرى فائقة الموصلية. ويكون عدد أشباه الجسيمات المستحدثة متناسبا مع طاقة الفوتون. ولكن لما كان المكشاف مبرّدا إلى ما دون درجة حرارته الانتقالية بكثير، فلا يزال ثمة بحر من أزواج كوبر السالمة، وبذا تبقى المقاومة الكهربائية معدومة. ولذا ينبغي أن يكون المكشاف الفاصل للأزواج قادرا على التمييز بين أزواج كوبر وأشباه الجسيمات.

إن أحد الأجهزة القادرة على القيام بهذه المهمة هو **الوصلة النفقية الفائقة الموصلية** superconducting tunnel junction، المؤلفة من غشاءين فائقي الموصلية تفصلهما طبقة رقيقة من مادة عازلة. فإذا كان العازل رقيقا لدرجة كافية (نحو 2 نانومتر)، أمكن للإلكترونات أن تعبر من أحد جانبي الحاجز إلى الجانب الآخر بواسطة سيرورة تُعرف **بالعبور النفقي الكمومي** quantum-mechanical tunneling. ويؤدي تطبيق مجال مغنطيسي صغير إلى منع أزواج كوبر من العبور النفقي عبر الوصلة، فلا يستطيع العبور إلا أشباه الجسيمات. بعد ذلك يمكن تطبيق فلطية على الجهاز. فلا يمر تيار إلا حين يمتص أحد الغشاءين الفائقي الناقلية فوتونا يولّد أشباه جسيمات. وتكون نبضة التيار الناتجة متناسبة مع عدد أشباه الجسيمات المستحدثة وإذًا مع طاقة الفوتون وتردده.

يقوم حاليا فريق يقوده <J. زميدزيناس> [من معهد كاليفورنيا للتقانة] و<P. داي> [من مختبر الدفع النفاث Jet Propulsion] بتطوير جهاز آخر لقياس عدد أشباه الجسيمات في موصل فائق. وهو يدعى **مكشاف التحريضية (المحاثة) الحركية الميكروية الموجات** microwave kinetic inductance detector. وهو يستفيد من حقيقة أن بنية فائقة الموصلية يمكن أن يكون لها تجاوب (رنين) كهرمغنطيسي عند تردد الموجات الميكروية مثلما أن **للشوكة الرنانة** tuning fork تجاوبا ميكانيكيا عند تردد مسموع (الشوكة الرنانة تتذبذب فيما الموصل الفائق يفسح مجالا لتيار كهربي مهتز). فحين تكوّن الفوتونات أشباه جسيمات في موصل فائق يصبح التجاوب أقل حدة ويتباطأ انتشار الموجة، وهذا يخفض تردد التجاوب. ويتناسب الانزياح في كل من تردد التجاوب وفي حدته مع عدد أشباه الجسيمات. والنتائج الأولية من هذه الأجهزة واعدة إلى أبعد حد.

إن المكاشيف الفائقة الموصلية المنفردة مفيدة لبعض التطبيقات، مثل تحليل المواد، لكن التصوير العملي يتطلب صفيفا كبيرا من المكاشيف (أو العنصورات) شبيها بصفيف الأجهزة CCD في آلة التصوير الرقمية. وتبرز مشكلة عند وصل صفيف المكاشيف البالغ البرودة بإلكترونياته المرفقة به الواقعة في درجة الحرارة العادية. لو مرر المرء ببساطة سلكا من كل عنصورة لتدفقت كمية كبيرة من الحرارة في الأسلاك، وهذا يخرب الموصلية الفائقة للمكشاف. والطريقة الأفضل هي استخدام توصيلات داخل الجزء البالغ البرودة من الجهاز بصورة تتحد، أو **تنضم** multiplexed، فيها الإشارات الآتية من العديد من العنصورات فتسري في عدد قليل من الأسلاك تصل بين الجزء البارد والإلكترونيات الدافئة.

وأكثر الصفيفات المتاحة تقدما، الفائقة الموصلية المتعددةُ قنواتها، أساسُها المكاشيف TES. وكما بينا آنفا، حين يمتص المكشاف TES فوتونا يتغير التيار عبر المكشاف لكن التيار صغير جدا ولذلك يقاس بواسطة

(*) SUBMILLIMER ASTRONOMY
(**) Counting Quasiparticles

وصل كل عنصورة **بجهاز تداخل كمومي فائق الموصلية** superconducting quantum interference device (أو **سكويد** SQUID) لا يحدّ من حساسيته سوى الميكانيك الكمومي [انظر: «*أدوات تداخل كمومية فائقة التوصيل*»، **العلوم**، العدد 10 (1996)، ص 51]. يحوّل السكويد نبضة التيار الصغيرة جدا إلى إشارة فلطية كبيرة لدرجة تكفي لأن تقاس بواسطة الإلكترونيات العادية. ويمكن مضاعفة قنوات إشارات الخرج من العديد من السكويدات بجمع فلطياتها وإرسال المحصلة في سلك واحد، إلا أن هناك ما ينبغي القيام به بعد ذلك لكي يكون بالإمكان تمييز الإشارات الآتية من كل مكشاف على حدة. ففي **مضاعفة القنوات ذات التقسيم الزمني** time-division multiplexing تُشغَّل السكويدات واحدا واحدا، في حين في **مضاعفة القنوات ذات التقسيم الترددي** frequency-division multiplexing تعمل السكويدات عند ترددات مختلفة، وهذا يتيح فصل (تحليل) إشاراتها لاحقا.

كذلك يمكن مضاعفة قنوات العنصورات في مكشاف التحريضية (المحاثة) الحركية الميكروية الموجات (النوع الذي يهتز مثل الشوكة الرنانة) بواسطة توليفها عند ترددات تجاوبية (رنينية) مختلفة ووصلها جميعها على التوازي وقراءتها بواسطة ترانزستور بارد واحد وخط خرج واحد يصل إلى مضخم في درجة الحرارة العادية. وقد تبين حتى الآن أن مضاعفة قنوات صفيفات كبيرة من مكاشيف الوصلة النفقية أمر صعب، مع أن التقنيات الجديدة لاستعراض قراءة الموجات الميكروية يمكنها أن تجعل الصفيفات المتعددة قنواتها ممكنة التحقيق.

تطبيقات لا تعد ولا تحصى[*]

إن المكاشيف الفائقة الموصلية المتاحة اليوم أكثر حساسية 100 إلى 1000 مرة من المكاشيف العادية التي تعمل عند درجة حرارة الغرفة. وهذه الأجهزة تحسِّن القياسات في مدى واسع من المجالات.

منع انتشار الأسلحة النووية والدفاع الوطني. إن إحدى الأولويات الدولية المستعجلة هي مراقبة انتشار المواد النووية التي يمكن أن تستخدم في هجوم يقوم به إرهابيون أو دول مارقة. تحتوي المواد النووية على نظائر غير مستقرة تصدر الأشعة السينية وأشعة كاما. وتوافر الطاقات المميزة لهذه الفوتونات بصمة تكشف عن ماهية النظائر المشعة الموجودة. ولكن لسوء الحظ تُصدر بعض النظائر الموجودة في تطبيقات حميدة أشعة كاما ذات طاقات شبيهة جدا بتلك التي تصدرها مواد تستخدم في الأسلحة، وهذا يؤدي إلى تحديد ملتبس وإلى تحذيرات زائفة.

> يحتاج التصوير العملي إلى صفيف كبير من المكاشيف، شبيه بصفيف الأجهزة CCD في آلة التصوير الرقمية

كانت هذه المشكلة تربك الولايات المتحدة التي تركِّب آلاف أجهزة مراقبة الإشعاع عند المداخل الحدودية لكشف أشعة كاما التي تصدرها المواد النووية المحمولة في عربات تعبر الحدود الكندية والمكسيكية. فأحد أكبر مخاوفنا هو أن يتمكن الإرهابيون من تهريب يورانيوم عالي التخصيب (من النوع الذي يستخدم في الأسلحة) إلى البلاد لصنع قنبلة ذرية بدائية من النمط الذي ألقي على هيروشيما [انظر: «*إحباط الإرهاب النووي*»، **العلوم**، العددان 9/8 (2006)، ص 46]. إن البصمة الأولى لليورانيوم العالي التخصيب تتمثل في أشعة كاما ذات الطاقة 185.7 كيلوإلكترون فلط (keV) الصادرة عن اليورانيوم 235. لكن أشعة كاما هذه لها الطاقة نفسها تقريبا مثل أشعة كاما 186.1 keV التي تصدر عن الراديوم 226 الموجود في الطين في الحاويات المخصصة للقطط وفي مواد أخرى، وهذا يجعل التمييز بين الاثنين صعبا جدا. هذه المشكلة المسماة **مشكلة حاوية الهرّة** kitty litter problem هي أكبر مصدر للتحذيرات الزائفة عند حدود الولايات المتحدة.

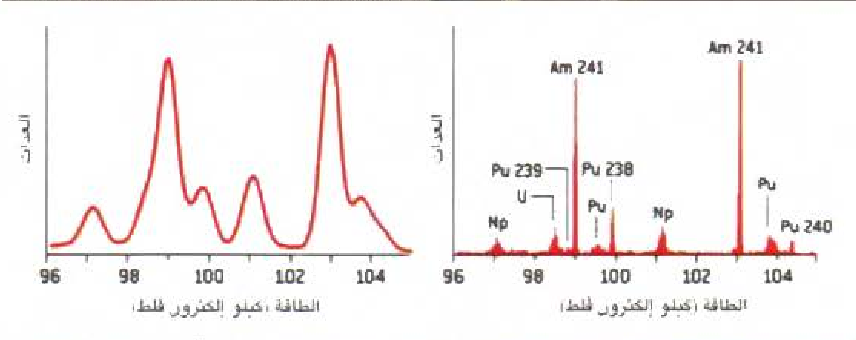
وقد قام فريق يقوده «M. رابين» [من مختبر لوس ألاموس الوطني] و«J. أولوم» [من المعهد الوطني للمعايير والتقانة (NIST) في بولدر بكولورادو] وفريق آخر [في مختبر ليفرمور الوطني] بتطوير مكاشيف أشعة كاما مبنية على أساس التقانة TES وتتمتع بقدرة تمييز طاقية تفوق أكثر من عشر مرات تلك التي للمكاشيف العادية؛ إذ تستطيع هذه المكاشيف فصل عدد أكبر من الخطوط في طيوف أشعة كاما المعقدة للمواد النووية، مثل مزائج نظائر اليورانيوم والبلوتونيوم [*انظر الرسمين البيانيين في الصفحة 50*]. وقد طُوِّرت هذه الأجهزة خصوصا للمساعدة على التحقق من المعاهدات الدولية حول عدم الانتشار، وذلك بواسطة تعيين المحتوى من البلوتونيوم في الوقود النووي المستهلك. ولكن بإمكانها أن تميز كذلك بين الراديوم 226 في حاويات القطط واليورانيوم 235 في اليورانيوم العالي التخصيب. فلو أن مكشافا عاديا محمولا باليد أو جهاز مراقبة المداخل كشف إشارة أشعة كاما، لكان بالإمكان استخدام أحد الأجهزة الفائقة الموصلية أداةً لمتابعة التمييز بصورة لا لبس فيها بين هذين النظيرين، فينتفي بذلك العديد من التحذيرات الزائفة.

تحليل الشيبات الميكروية. أحد التطبيقات المهمة في صناعة أشباه الموصلات هو التحليل الميكروي (الدقيق)[1] بواسطة المجس الإلكتروني. فحين يشكل **مجهر إلكتروني ماسح** scanning electron microscope صورة لعيِّنة ما، فإن حزمة الإلكترونات تجعل العينة تصدر أشعة سينية. فيمكن إذًا تعيين تركيب العينة الكيميائي في النطاق النانومتري للحزمة بواسطة قياس طاقات مختلف الأشعة السينية الصادرة. وحين تمسح الحزمة كامل العينة تُظهر الصورة الحاصلة أين توجد مختلف المركبات الكيميائية، فتعطي خريطة للبنى التي تحدد كيفية عمل الشيبة الميكروية.

تستخدم صناعة أشباه الموصلات حاليا مكاشيف شبه موصلة للأشعة السينية بغية دراسة البنى والعيوب الموجودة على الشيبات الميكروية. ولكن لما صارت الشيبات الميكروية تستخدم بنى أصغر، فإن الأمر يتطلب جيلا جديدا من أدوات التحليل الميكروي تتصف بحساسية أعلى. وقد تصدت مجموعتي في

(*) Myriad Applications
(1) electron-probe microanalysis





تستعمل المكاشيف حاليا في المرافئ وأمكنة أخرى التحري عن المواد النووية المهرّبة إلى البلاد (الصورة). ليس بمقدرة المكاشيف شبه الموصلة العادية التمييز بين بعض النظائر في عينة اختبار (الرسم البياني الأيسر). أما القياسات التي تجرى بواسطة مكشاف فائق الموصلية فيمكنها فصل الخطوط جميعها بوضوح (الرسم البياني الأيمن)، بما في ذلك وجود البلوتونيوم 239، النظير المفضل للأسلحة النووية.

المعهد NIST لهذا التحدي بأن طورت منظومة تحليل ميكروي مبنية على أساس المكاشيف TES ذات قدرة ميز طاقية أفضل 50 مرة من المكاشيف شبه الموصلة المتوافرة تجاريا، وهذا مكنها من فصل العديد من قمم الأشعة السينية الطيفية المهمة. ومثل هذه المنظومات للتحليل الميكروي صارت حاليا متاحة تجاريا.

الفلك دون المليمتري. الفلك حقل حافل بالفرص بالنسبة إلى المكاشيف الفائقة الموصلية. وكثيرا ما كان الفلكيون وراء تطوير تقانات مكاشيف جديدة بسبب حاجتهم إلى قياس إشارات ضعيفة جدا آتية من أجسام نائية.

تعمل مجموعتي في المعهد NIST مع مركز التقانة الفلكية البريطاني في إدنبورك ومع الشركة Raytheon Vision Systems في كوليتا بكاليفورنيا ومع جامعات في المملكة المتحدة وكندا لتطوير آلة تصوير فائقة الموصلية تدعى SCUBA-2 لاستخدامها في **مقراب** telescope جيمس كليرك ماكسويل فوق قمة مونا كيا Mauna Kea في الجزيرة الكبيرة بهاواي. وسوف يحل المكشاف SCUBA-2 محل المكشاف (Submillimeter Common-User Bolometer Array) SCUBA الذي هو مكشاف أساسه صفيف من أشباه الموصلات كان قد طوره مركز التقانة الفلكية البريطاني. والمكشاف SCUBA يصور مناطق تشكل الكواكب والنجوم والمجرات بواسطة كشف الأشعة التي أطوالها الموجية دون المليمتر. وهي أقصر من الموجات الميكروية لكنها أطول من الضوء المرئي.

وحتى زمن قريب، لم يكن باستطاعة الفلكيين الوصول إلى هذا المدى من الأطوال الموجية، لأن طاقة الفوتونات في النطاق دون المليمتري صغيرة لا تكفي لإحداث إثارة في شبه الموصل. لكن ترددها أعلى من أن يمكن تضخيمه بصورة فعالة بواسطة مستقبلات شبيهة بمستقبلات الراديو. ولكن المدى دون المليمتري حقيق بأن يُتابع، لأنه يحتوي على 98 في المئة من الفوتونات التي انبعثت منذ الانفجار الأعظم. ويتيح هذا المدى، ضمن ما يتيح، رصد مناطق داخل السحب الجزيئية تكون مخفية عند الأطوال الموجية الأخرى. يعمل المكشاف SCUBA بواسطة كشف تسخين عنصوراته شبه الموصلة المبرَّدة البالغ عددها 128. وهذه عملية أبطأ وأقل حساسية بكثير من التقانة الفائقة الموصلية المعتمدة في المكشاف SCUBA-2.

سيكون المكشاف SCUBA-2، حين يُستكمل، مؤلفا من 10 000 عنصورة استعراض قراءة المكشاف TES مع **مضاعفات قنوات** (multiplexers) فائقة الموصلية. وسوف يتيح تصوير أجسام فلكية بسرعة أكبر حتى 1000 مرة. وقد صُنعت صفيفات النموذج الأولي للمكشاف SCUBA-2 ذات 1280 عنصورة [انظر الإطار في الصفحة 48]. وينبغي أن تكون آلة التصوير الكاملة في حالة عمل في المقراب بحلول عام 2007. وهناك العديد من منظومات المكاشيف الفائقة الموصلية في مجالي الموجات المليمترية ودون المليمترية قيد التطوير لمختلف المراصد والسواتل.

الكوسمولوجيا (علم الكون). في السنين الأخيرة أتى بعض أهم الاكتشافات حول فهمنا للكون من قياس إشعاع **الخلفية الكونية من الموجات الميكروية** (cosmic microwave background (CMB. فالفوتونات في الخلفية الكونية CMB هي صورة لحظية للكون بعد نحو 400 000 سنة من الانفجار الأعظم، لأن معظم فوتونات الخلفية CMB مرت عبر الكون أثناء الـ 13 بليون سنة الماضية من دون أي تغير. وأحدثت الموجات الصوتية في بلازما الكون المبكر نماذج في إشعاع الخلفية CMB يراها الفلكيون اليوم [انظر «السيمفونية الكونية»، **العلوم**، العددان 5/4 (2004)، ص 56]. وقد أظهرت قياسات هذه النماذج، إضافة إلى أرصاد كوسمولوجية أخرى، أن 5 في المئة من الكون الحالي فقط يتألف من المادة والطاقة العاديتين المألوفتين بالنسبة إلينا، وأن نحو 22 في المئة هي **مادة خفية** dark matter و73 في المئة هي حقل غامض يعرف **بالطاقة الخفية** dark energy.

وإضافة إلى النماذج المتأتية عن الموجات الصوتية هناك نماذج أكثر رهافة ينبغي أن تكون قد طُبعت على استقطاب إشعاع الخلفية الكونية CMB بواسطة

موجات الثقالة التي كانت قد تولّدت أثناء فترة تمدد كوني أسّي يعرف **بالتضخم** inflation. وهو ما يسمى **الخلفية الكونية من الموجات الثقالية** cosmic gravity-wave background (في الضوء المستقطب يكون المجال الكهربي من الموجة الكهرمغنطيسية ذا منحى معين عوضا عن أن يكون مهتزا في جميع الاتجاهات بصورة عشوائية). وقد نشأ استقطاب الإشعاع CMB هذا حين تبعثر الإشعاع عن البلازما الأولية، تماما مثلما يستقطب الضوء المرئي حين ينعكس عن سطح ما.

سرعان ما سيستخدم الفلكيون مكاشيف فائقة الموصلية ذات حساسية للاستقطاب للبحث عن الخلفية الكونية من الموجات الثقالية. في البداية سوف تستخدم هذه الأجهزة مقاريب متخصصة موجودة على الأرض وكذلك محمولة في مناطيد عالية الارتفاع. وفيما بعد، تخطط الوكالة ناسا لإطلاق ساتل يدعى **مجس التضخم** Inflation Probe للقيام بالقياسات النهائية لاستقطاب الخلفية CMB. ويمكن أن يوافر القياس الناجح لنماذج الموجات الثقالية هذه فهما أعمق للفيزياء التي كانت سائدة أثناء الجزء الأول من تريليون من تريليون من تريليون من الثانية بعد الانفجار الأعظم، حين حدثت التآثرات عند الطاقة التي كانت القوى جميعها عندها، ما عدا الثقالة، موحدة في قوة واحدة كان الفيزيائيون يحلمون دائما، منذ أينشتاين، بالتحري المباشر لنظام «التوحيد الكبير» هذا. إلا أن طاقة أكبر مسرّعات الجسيمات الموجودة على الأرض أخفض تريليون مرة من الطاقة اللازمة. وسوف تساعد المكاشيف الفائقة الموصلية العلماء على استخدام مختبر الكون للوصول إلى طاقات لا يمكن الوصول إليها أبدا بالتجارب الأرضية.

صفيفات عملاقة(*)

إن الإمكانات الكاملة للمكاشيف الفائقة الموصلية لم تتحقق بعد، على الرغم من التقدم الهائل الذي أُحرز في تقانة هذه المكاشيف في العقد الماضي. وأهمية الأجهزة CCD لم تُدرك تماما إلا بعد أن أُخذت الصور بواسطة صفيفات كبيرة جدا من العنصورات. وإذا نظرنا إلى المستقبل وجدنا أن صفيفات ذات مقياس كبير من المكاشيف الفائقة - تحوي حتى 10 000 عنصورة عند الأطوال الموجية المليمترية وملايين العنصورات في نطاق الأشعة السينية - سوف تُطوّر باستخدام تقنيات تصنيع جديدة ويتضمن مضاعفة قنوات الإشارة عند الترددات الميكروية. وهذا سوف يتيح استعراض قراءة عدد أكبر كثيرا من العنصورات في سلك واحد. ويعمل المهندسون على تطوير **نظم قرّيّة** cryogenic systems(1) أصغر وأرخص لتبريدها. وسوف يكون لهذه الصفيفات الكبيرة الفائقة الموصلية تأثير حتى في مجال أوسع من فروع المعرفة. وسوف تبقى الصفيفات ذات «عنصورات» أقل من تلك التي في الشبكية البشرية، إلا أنها سوف تأخذ الرؤية البشرية إلى عوالم جديدة مثيرة من الاكتشاف. ■

(*) Giant Arrays

(**) Other Uses

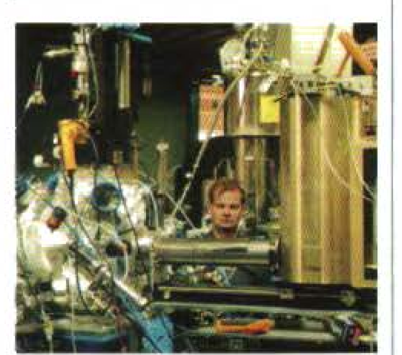
(1) cryogenic system: جهاز شديد البرودة يحفظ درجة الحرارة في داخله بحيث تكون أقل مما هي في خارجه. (التحرير)

استخدامات أخرى(**)

صارت المكاشيف الفائقة الموصلية، إضافة إلى استخداماتها المذكورة في النص الرئيسي، تستخدم في المجالات الآتية:

- مطيافية الأشعة السينية في السنكروترونات (اليمين)، بما في ذلك التحليل الكيميائي للمعادن في البروتينات وفي عينات أخرى.
- الكشف الفعّال عن بوليمرات بيولوجية كبيرة وعن شظايا الدنا DNA في مقاييس الطيف الكتلي. وهذا له تطبيقات في **الجينوميات (علم الجينوم)** genomics **والبروتيوميات (علم البروتينات)** proteomics واكتشاف الأدوية وتحليل المركّبات الطبيعية.
- عدّ الفوتونات عند الأطوال الموجية (تحت الحمراء) المستخدمة في الاتصالات من أجل التعمية الكمومية.
- البحث عن جسيمات كبيرة الكتلة متأثرة تأثرا ضعيفا، يفترض أنها تشكل المادة الخفية في الكون.

K. D. I.



تجربة في السنكروترون في مختبر لورنس بيركلي الوطني

sa للمزيد حول عدّ الفوتونات وتطبيقات المادة الخفية انظر: www.sciam.com/ontheWeb

المؤلف

Kent D. Irwin

يقود مشروع المحسات الكمومية في المعهد الوطني للمعايير والتقانة NIST في بولدر بولاية كولورادو. وهو أستاذ مساعد للعلوم الفيزيائية الفلكية والكوكبية بجامعة كولورادو في بولدر. وقد حصل على البكالوريوس من معهد كاليفورنيا للتقانة وعلى الدكتوراه من جامعة ستانفورد. تشمل اهتماماته البحثية القياسات الدقيقة للإشارات الكهرمغنطيسية للفيزياء الكونية وكذلك الحدود الترموديناميكية والكمومية للمحسات والمكاشيف. حصل فريقه على الميدالية الذهبية لوزارة التجارة وعلى جائزة البحث التطبيقي للمعهد NIST لعمله في المكاشيف الفائقة الموصلية.

مراجع للاستزادة

Low-Temperature Particle Detectors. Norman E. Booth, Blas Cabrera and Ettore Fiorini in *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science.* Vol. 46, pages 471-532; 1996.

Quantum Calorimetry. Caroline K. Stahle, Dan McCammon and Kent D. Irwin in *Physics Today.* Vol. 52, No. 8, pages 32-37; August 1999.

Seeing Single Photons. Graham P. Collins in *Scientific American.* Vol. 290, No. 1, page 17; January 2004.

Transition-Edge Sensors. K. D. Irwin and G. C. Hilton in *Cryogenic Particle Detection.* Edited by Christian Enss. Springer-Verlag, 2005.

Scientific American, November 2006

أسرار البراكين العملاقة(*)

تكشف بلورات ميكروية في الرماد البركاني عن أدلة مدهشة على أكثر الاندفاعات البركانية تدميرا في العالم.

<I. N. بايندمان>

تحت سطح الأرض في ولايتي كاليفورنيا ووايومنك، يكمن بركانان في حالة سبات كانا قد ضربا المنطقة بعنف بالغ لا يمكن تصوره. وإذا ثارا فقد يغطيان خلال ساعات غرب الولايات المتحدة بسنتيمترات متعددة من الرماد البركاني. وبالفعل فقد ثارا على الأقل أربع مرات خلال المليوني سنة الماضية. وثمة براكين عملاقة أخرى مماثلة تكمن تحت أندونيسيا ونيوزيلندا.

ويكون لانفجار **بركان عملاق (سوبر بركان)** supervolcano القوة المدمرة نفسها لنجيم صغير يصطدم بالأرض ـ وقد تكون هذه القوة أحيانا أشد بعشر مرات، ما يجعل مثل هذا الانفجار أحد أكثر الكوارث الطبيعية تدميرا وينبغي للبشر توقع حدوثها. وإضافة الى ما تسببه البراكين العملاقة الثائرة من دمار مباشر ناجم عن تدفق الرماد البركاني المُحرق، تقذف هذه البراكين العملاقة الناشطة غازات تؤدي فيما بعد إلى تقلبات مناخية خطرة على الكرة الأرضية قد تدوم عدة سنوات.

ولذلك يتلهف الباحثون إلى معرفة الأسباب التي تؤدي إلى اندفاع البراكين العملاقة ومعرفة كيفية التنبؤ بزمن ما سوف تُحدثه ثانية من دمار وما هي التحديات التي يمكن أن تستتبع آثارها الكارثية. وقد أشارت التحاليل الحديثة للبلورات الميكروية في رواسب الرماد البركاني الناتج من الاندفاعات البركانية القديمة إلى بعض الأجوبة. وهذه الأفكار، إضافة إلى التقنيات المحسّنة لمراقبة مواقع الكوارث المحتملة، جعلت العلماء أكثر ثقة بإمكان تحديد إشارات منذرة قبل وقوع انفجار اندفاع كبير. ومع ذلك تُلمّح الأعمال الجارية إلى أنّ انبعاثات بركان عملاق يمكن أن تُطلق تفاعلات كيميائية مزعجة في الغلاف الجوي جاعلة الأشهر التي تعقب مثل هذا الحدث أكثر خطورة ممّا كان يظنّ من قبل.

يسود اتفاق كامل تقريبا بين جميع خبراء البراكين أنّه من غير المحتمل إلى أبعد الحدود أن يعاني الذين يعيشون حاليا على الكرة الأرضية تأثيرات بركان عملاق ناشط؛ إذ تنزع الاندفاعات البركانية الكارثية إلى الحدوث مرة واحدة كل عدة مئات من آلاف السنين. ومع ذلك فإنّ ضخامة مثل هذه الأحداث وتأثيراتها في الكرة الأرضية هيمنت على اهتمام العلماء منذ خمسينات القرن الماضي.

رهْبة مبكرة(**)

من الأشياء الأولى التي اكتشفها الجيولوجيون، وديان دائرية ضخمة ـ بقطر يراوح بين 30 و 60 كم وعمق عدة كيلومترات ـ وهذه الوديان تبدو مشابهة على نحو لافت للنظر إلى **الكلديرات** calderas الحوضية الشكل التي تقع على قمة الكثير من براكين الكرة الأرضية المشهورة. تتشكّل الكلديرات بصورة نموذجية عندما تُفرغ حجرةُ الصخور المنصهرة الواقعة تحت منفس بركاني محتواها (من **الصُهارة** magma) إلى سطح الأرض مسببة بذلك انهيار الأراضي التي فوقها. ويلاحظ أنّ هذه الوديان الشبيهة بالكلديرات تقع بالقرب من بعض أكبر الرواسب على الكرة الأرضية من الصخور البركانية التي توضّعت خلال انفجار بركان واحد. وبحسب ما توصّل إليه الباحثون فإنّ تلك الرواسب ما هي إلاّ بقايا براكين عملاقة ـ أكبر بمئات، بل بآلاف، المرات من البركان Mount Saint Helens المشهور في ولاية واشنطن. عرف الباحثون، من المقاس المفرط للكلديرات والحجم العملاق المقدّر من المواد البركانية المندفعة، أن حجم حجرات الصخور المنصهرة الموجودة تحتها كان هائلا أيضا.

وبسبب ندرة وجود **قشرة قارات** continental crust ثخينة ومصادر حرارية ضرورية لإحداث أمثال هذه الحجرات الكبيرة جدا من الصهارة، فإن وجود البراكين العملاقة نفسها نادر أيضا. فخلال المليوني سنة الماضية، قذفت هذه البراكين في آن واحد نحو 750 كيلومترا مكعبا على الأقل من الصهارة في أربع مواقع فقط: موقع يلوستون ناشيونال پارك في ولاية وايومنك وموقع لونك ڤالي في ولاية كاليفورنيا وموقع طوبا Toba في جزيرة سومطرا وأخيرا موقع تاوپو Taupo في نيوزيلندا. هذا ويستمر البحث عن اندفاعات بركانية كبيرة جدا مماثلة في المناطق الأخرى التي تتمتع بقشرة قارات ثخينة، كما هي الحال في غرب أمريكا الجنوبية وأقصى شرقي روسيا.

وفي الأحداث الماضية خلال سبعينات القرن الماضي، أظهرت التحقيقات الأسلوب الذي يمكن أن تتشكّل به حجرات الصهارة وتصبح خطرة. ففي موقع يلوستون وتحت

(*) THE SECRETS OF SUPERVOLCANOES
(**) Early Awe



حلقة من النار تنفجر من منافس بركانية عملاقة بحجم الجبل حول الحافة الخارجية لبركان عملاق ناشط. وسحبٌ حارة وخانقة تحجب الرؤية، وهي مؤلفة من الغاز والرماد البركاني.

سطح أرضها تتحرّك صفيحة أمريكا الشمالية التكتونية فوق **دفق** plume عائم من صخور منصهرة حارة لزجة القوام يصعد من **وشاح الأرض**[1] mantle. وهذا الدفق الحـار الذي يدعى **البقعة الحارة** hot spot ويقوم بوظيفة حراق **بُنزن** Bunsen ضخم أدّى إلى صهر، بمقدار كاف، القشرة الأرضية المتوضّعة فوقه ليحفّز الاندفاعات البركانية الكارثية خلال الـ16 مليون سنة الماضية. أمّا في موقع طوبا بجزيرة سومطرا فيبدو أنّ أسلوب منشأ حجرات الصهارة يكون مختلفا، فهذا المكان يقع فوق **نطاق الانغراز**[2] subduction zone، حيث تنزلق فيه صفيحة تكتونية تحت صفيحة أخرى، إذ يسبّب تقارب الصفيحتين تأججا حراريا واسع الانتشار خصوصا من خلال الانصهار الجزئي لوشاح الأرض فوق الصفيحة المنغرزة.

وبصرف النظر عن منشأ الحرارة، فإنّ الضغط في حجرات الصهارة يزداد مع الزمن مع تجمّع المزيد من الصهارة فيها وتحت تأثير الوزن الهائل للصخور الموجودة فوقها. ويحدث الاندفاع البركاني الكبير بعد أن ترفع الصهارة المنضغطة القشرة الأرضية المتوضّعة فوقها بمقدار كاف لإحداث شقوق شاقولية تمتد حتى سطح الكرة الأرضية. تندفع الصهارة نحو الأعلى في هذه الشقوق الجديدة الواحد بعد الآخر لتشكل، في آخر الأمر، حلقة من **المنافس** vents البركانية (الاندفاعية). وعندما تلتحم هذه المنافس

(1) طبقة في باطن الأرض ثخانتها 2900 كم تقع بين لب الأرض المنصهر وطبقة القشرة الأرضية الخارجية الرقيقة نسبيا.
(2) أو الانغراس.
(التحرير)

بعضها ببعض لا يبقى للأسطوانة الصخرية الكبيرة المتشكّلة ضمن حلقة المنافس أي دعامة تحملها. وهذا «السقف» ينهار، قطعة واحدة أو كتلا مجزأة، على ما تبقّى من الصهارة في الحجرة، مثلما ينهار سقف منزل فَقَدَ دعائمه. وهذا الانهيار يدفع نحو الأعلى وبشدة مزيدا من الغاز واللابة[1] بحيث ينفجر على محيط حلقة المنافس (*انظر الإطار في الصفحتين 56 و 57*).

أخذ بصمات الاندفاعات البركانية[*]

لايزال الغموض مستمرا. فمن الواضح، كما يدرك الباحثون اليوم، أنّ كل حجرة كبيرة من الصهارة لا تنفجر بالضرورة بصورة كارثية. فمثلا يعدّ موقع يلوستون موطنا لأحداث انفجارية تمثلها ثلاث كلديرات لأحدث البراكين العملاقة في العالم - تشكلت على التتالي الواحدة فوق الأخرى قبل 2.1 مليون سنة و1.3 مليون سنة والأخيرة قبل 000 640 سنة. ومع ذلك، في الفترات الفاصلة بين هذه الأحداث الانفجارية، كانت حجرة الصهارة تطلق أحجاما مماثلة من الصهارة ببطء وهدوء. ولا يزال حتى الآن سبب صعود الصهارة أحيانا ببطء نحو سطح الأرض غامضا.

إن البحث في تركيب بلورات صغيرة محتجزة داخل اللابة والرماد البركاني في موقع يلوستون، أشار إلى جواب جزئي، وذلك بتقديم فكرة جديدة عن كيفية تشكّل الصهارة. ولعقود من الزمن، افترض الجيولوجيون أنّ الصهارة تستقر كحوض من الصخور المنصهرة لملايين من السنين في زمن من الأزمان. وفي كل زمن ينسكب جزء منه إلى سطح الأرض تعوّضه مباشرة كمية جديدة من الصخر المنصهر تصعد من الأسفل لتعيد ملء حجرة الصهارة من جديد. فإذا كان هذا التصوّر صحيحا سيتوقّع المرء الكثير الكثير من الاندفاعات البركانية العملاقة والكارثية، بسبب تعذّر حفظ كتل الصهارة الكبيرة في القشرة الأرضية من الناحيتين الميكانيكية والحرارية من دون تفريغها بصورة متكرّرة.

اعتمدت الفكرة القديمة اعتمادا كبيرا على ما يدعى تحليل كامل الصخر الذي يسمح للباحثين بالحصول على مجموعة واحدة من القياسات الكيميائية لكل عينة بحجم قبضة اليد جمعها الباحثون من الصخر البركاني. ووفرت تلك البيانات أنماطا عامة ومهمة لتطور الصهارة، ولكنّها كانت غير كافية لتحديد عمر الصهارة المقذوفة والعمق الذي تشكلت فيه.

إنّ كل كتلة من الصخر الاندفاعي مكوّنة في الواقع من آلاف البلورات الصغيرة وكل بلورة تنفرد بعمرها وتركيبها ومجريات تشكّلها عن غيرها من البلورات. وهكذا عندما أمكن للتقدّم التقاني في أواخر الثمانينات من القرن الماضي من تحليل البلورات الفردية بدقة مقبولة، كان ذلك بمثابة قراءة فصول منفردة من كتاب ولبس الاعتماد على قراءة دعاية التعريف به على غلاف هذا الكتاب لشرح موضوعه. بدأ الباحثون بإدراك أنّ بعض البلورات - ومن ثم الصهارات التي تشكّلت ضمنها في الأصل - نشأت على سبيل المثال بزمن أبكر من غيرها وأنّ بعضها تشكّل في الأعماق تحت سطح الأرض، في حين تشكّل بعضها الآخر بالقرب من هذا السطح.

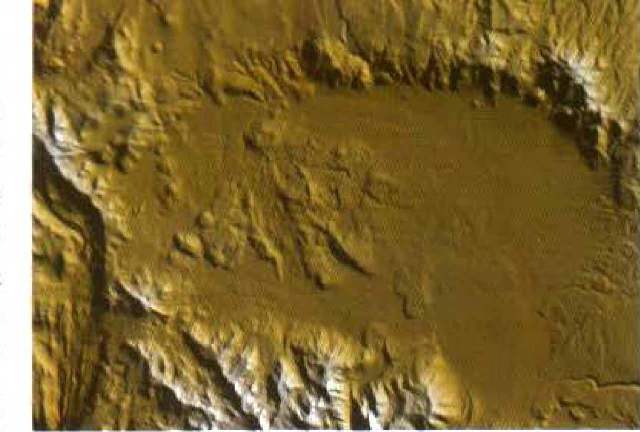
وخلال عشر السنوات الماضية، اهتم الجيوكيميائيون اهتماما خاصا بنمط مستقر من البلورات البركانية يدعى الزركون Zircone. ومن المعلوم أن بلورات الزركون يمكن أن تتحمّل تغيرات بالغة من حيث الحرارة والضغط من دون أن يتعرّض تركيبها الأصلي إلى التغيير. فقد استخدمها بعض الباحثين - ومن بينهم <J.W. ڤالي> [من جامعة ويسكونسين في ماديسون] لدراسة التطوّر المبكر للقشرة الأرضية [انظر: «*هل كانت الأرض باردة في بداية تكوّنها؟*»، **العلوم**، العدد 12 (2005)، ص 20]. وعندما انضممت إلى فريق <ڤالي> كزميل فيما بعد الدكتوراه في عام 1998، استخدمنا عينات بلورات الزركون المأخوذة من موقع «يلوستون» لاقتفاء أثر تاريخ صهارتها الأصلية التي تشكّلت فيها والتي كشفت بدورها عن أدلة مهمة على السلوك الذي يمكن أن يسلكه البركان في المستقبل.

كانت الخطوة الأولى في قياس نسب النظائر المختلفة من الأكسجين في بلورات الزركون من أحدث اندفاع بركاني كبير في موقع يلوستون - الذي نتج بعد انفجاره، قبل 000 640 سنة، ترسب تشكيلة طف لاڤا كريك[2] - وهي عبارة عن رواسب أحفورية من الرماد البركاني المتصلّب تصل ثخانتها في بعض الأمكنة إلى 400م - إضافة إلى ترسّب رواسب أحدث كانت قد قذفت خلال اندفاعات أقل شدة منذ ذلك الزمن. وعندما أنهيت تحاليلي الأولية كنت مندهشا مع <ڤالي> من استنتاج أنّ تركيب الأكسجين في تلك البلورات من الزركون لا يماثله في بلورات زركون وشاح الأرض العميق الحار، كما كان متوقّعا فيما لو أنّ حجرات الصهارة المفرّغة كانت تُملأ دائما من الأسفل. يكون لبلورات الزركون المتشكّلة في الصهارات التي يكون أصلها من الوشاح بصمة متميّزة: إذ عندما تتجمّع العناصر المنصهرة في الصهارات لتشكيل بلورات الزركون، فإنّ هذه البلورات تأخذ نسبة مرتفعة واضحة من

نظرة إجمالية/ اندفاعات بركانية عملاقة[**]

- قلبت تحاليل حديثة لتركيب بلورات صغيرة، موجودة ضمن رواسب الرماد البركاني الناتجة من اندفاعات بركانية ما قبل تاريخية، معتقدات قديمة حول سلوك البراكين العملاقة - وكشفت عن مفاجآت جديدة حول الآثار التي تتركها الكوارث.
- إنّ المجريات الداخلية في حجرات الصهارة التي تفجّر البراكين العملاقة يمكن أن تتطوّر بطرائق تؤثّر بقوة في أسلوب الاندفاعات البركانية في المستقبل.
- إن فترة الشتاء البركاني volcanic winter الذي يسيطر على الكرة الأرضية عند ثوران بركان عملاق، أقصر، على الأرجح، ممّا كان يعتقد من قبل، مع أنّه يمكن أن تكون تفاعلاته الكيميائية مع الغلاف الجوي أكثر خطورة.

(*) Fingerprinting Eruptions
(**) Overview: Mighty Eruptions
(1) لابة تعريب lava، ويقال أيضا حمم.
(2) Lava Creek tuff، والطف: رماد بركاني متصلب.
(التحرير)





لم تكن البراكين العملاقة الخامدة في موقع لونگ ڤالي بولاية كاليفورنيا (*الشكل العلوي*) على شكل قمم واضحة مخروطية الشكل مثل ما هي عليه في ماونت سانت هيلينز بولاية واشنطن (*الشكل السفلي*)، وإنما تتميز، عوضا عن ذلك، بفوهات بركانية عملاقة (كلديرات)، وهي منخفضات في سطح الأرض تشكلت عندما انهارت الأرض نحو حجرات الصهارة التي غذّت معظم الاندفاعات البركانية الكبيرة الحديثة.

اندفاعات بركانية متميّزة قد حدثت على مر ملايين السنين لإنتاج تشكيلة «طف بيشوب» الواسعة الانتشار. ولكن الدراسات الدقيقة لقطيرات ميكروية من الصهارة المحتجزة ضمن بلورات صغيرة من الكوارتز كشفت عن تفسير مختلف. يعتمد معدل السرعة التي تترك فيها الصهارة حجرتها بصورة رئيسية على عاملين اثنين: لزوجة الصهارة (أي قدرتها على الجريان) وفرق الضغط بين حجرة الصهارة وسطح الأرض. ولأنّ الضغط داخل قطيرة الصهارة يماثل ضغط الحجرة التي تشكلت فيها الصهارة، فإنّ قطيرة الصهارة تُماثل نسخة مصغرة عن حجرة الصهارة نفسها.

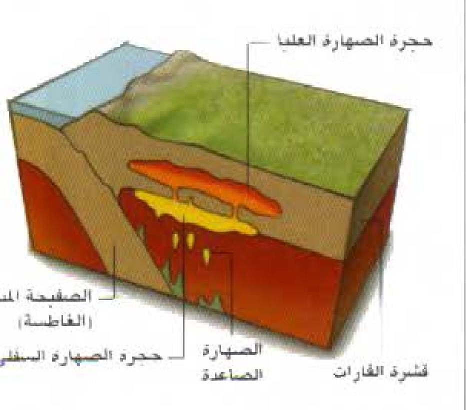
وبإدراك هذا التماثل درس «A.» أندرسون [من جامعة شيكاگو] مع زملائه حجم قطيرات الصهارة تحت المجهر لتقدير المدة التي تستغرقها الصهارة لتنسكب على السطح. يعتقد الجيولوجيون حاليا، اعتمادا على ما ذُكر وعلى تجارب أخرى وملاحظات ميدانية خلال التسعينات من القرن الماضي، أنّ تشكيلة «طف بيشوب» ـ ومن المحتمل أن معظم الرواسب البركانية الأخرى المنبثقة من الاندفاعات الكبيرة ـ كانت قد قُذفت في انفجار واحد دام ما بين 10 و100 ساعة.

كان على الباحثين، بعد هذا الاكتشاف، أن يعدّلوا فكرتهم المتعلقة بإعادة تكوين اندفاعات البركان العملاق (السوبر بركان)؛ وهذا ما يتوقعونه بصورة عامة حاليا من حَدَث بحجم الأحداث التي ضربت موقعي «لونگ ڤالي» و«بلوستون». عوضا عن انسكاب بطيء للابة حارة متوهجة كما ترى وهي تسيل الآن على جوانب البركان Kilauea في جزيرة هاواي، تكشف هذه الاندفاعات عن انفجارات فوق صوتية من مزيج رغوي القوام ذي حرارة عالية جدا مؤلف من الغازات والرماد البركاني يرتفع في الجو إلى طبقة **الاستراتوسفير** stratosphere إلى ارتفاع 50 كم. وبسبب انهيار الأراضي فوق حجرة الصهارة تنفجر سحب رمادية كثيفة مؤلفة من صخور **فتاتية نارية** Pyroclastic، وتتدفق بصورة أفقية على كامل محيط الكلديرا. وتشكّل هذه التدفقات مظهرا متوسطا بين اللابة والرماد البركاني، ولذلك فإنّها تتحرك بسرعة كبيرة جدا تصل إلى 400 كم بالساعة، بحيث لا تتمكّن السيارات والطائرات الصغيرة، بحسب بعض المصادر، أن تنجو منها. وإضافة إلى ذلك تكون هذه التدفقات حارة جدا ـ من 600 إلى 700 درجة مئوية ـ فهي تؤدّي إلى حرق ودفن كل شيء في طريقها الذي يمتد إلى عشرات الكيلومترات في جميع الاتجاهات.

يمكن أن يكون للرماد البركاني المندفع نحو الغلاف الجوي، الذي يكون مؤذيا مثل الأذى الذي تسبّبه تدفقات الصخور الفتاتية النارية، عواقب أخطر إلى أبعد الحدود. فقد يسقط هذا الرماد البركاني ذو اللون الرمادي الباهت كما يندف الثلج، ربّما لمدة أيام أو أسابيع، على مناطق تبعد مئات الكيلومترات عن مكان الاندفاع البركاني. وضمن مسافة 200 كم من الكلديرا قد يختفي معظم ضوء الشمس، وهكذا قد تبدو السماء عند الظهيرة مثلما تبدو عند هبوط الليل. وقد تدفن، وأحيانا تسحق، المنازل والناس والحيوانات وحتى على بعد 300 كم. يمكن أن تصل ثخانة طبقة الرماد البركاني المترسب نصف متر. وإذا اختلط هذا الرماد مع المطر سيكون وزنه كافيا جدا لانهيار سقوف المنازل. وقد تعطّل كمية أقل من هذا الرماد التيار الكهربائي ومحطات البث الإذاعي. وبثخانة طبقة قدرها مليمتر واحد من الرماد البركاني التي يمكن أن تغطي سطح نصف محيط الكرة الأرضية، قد

دورات فائقة(*)

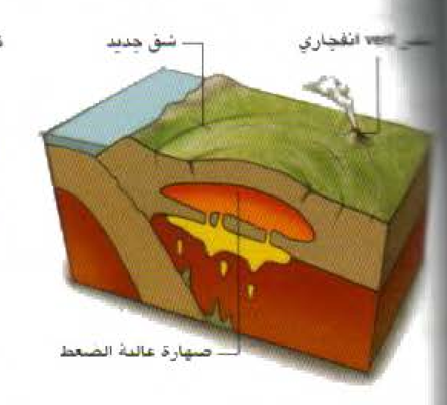
تتشكّل الحجرات العملاقة من **الصهارة** magma ال
تغذّي البراكين العملاقة فوق **البقع الحارة** spots
(أعمدة في أعماق الأرض تصعد عبرها الصخ

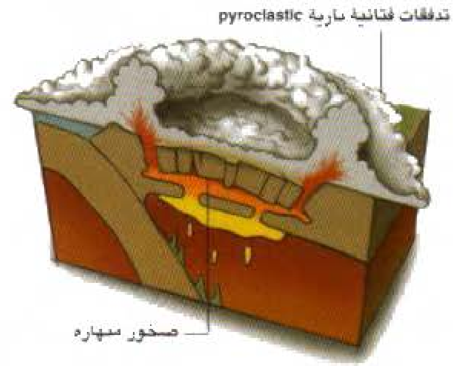


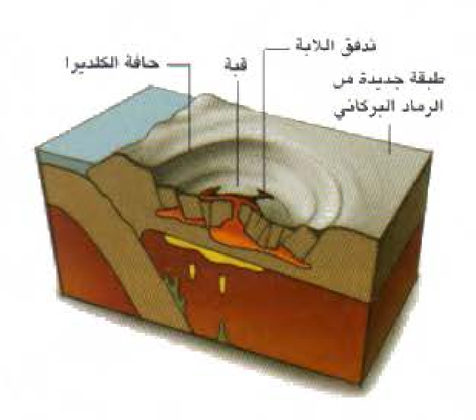
1 ينتج من الانصهار الجزئي لصخور وشاح الأرض الوا
فوق الصفيحة المغرزة من قشرة المحيطات **الصهارة**
(الماگما) التي تتقدّم صاعدة نحو الأعلى باتجاه قاعدة قشرة
القارات وتتجمّع هناك. تقوم حجرة الصهارة السفلى بعمل
حَرّاق سُرن ضخم يصهر في آخر الأمر جزءا من قشرة القا
التي يكون لصخورها نقطة انصهار أخفض من الصخور
الموجودة تحتها. تصعد بعض الصهارة أيضا عن طريق أقنية
شاقولية بين الحجرتين.

(*) SUPERCYCLES

...) أو فوق **نطق الانغراز** subduction zones (وهي النطق حيث تنغرز ... تكتونية تحت صفيحة أخرى). ففي كلتا الحالتين، تتجه البراكين ... إلى اتباع دورة اندفاعية التي هي أفضل فهما حاليا ممَّا كانت عليه من قبل. وفيما يلي أشكال للخطوات الأساسية الأربع، بدءا من التشكيل الأولي لحجرة الصهارة، يتمثّل في كل منها نطاق الانغراز.







2 بقدر ما يزداد حجم حجرة الصهارة العليا بقدر ما تنتفخ الأرض التي فوقها وتتشقق. إنّ تركيب هذه الصهارة الغني بالسيليكا ودرجة حرارتها المنخفضة ... إلى تركيب وحرارة وشاح الأرض، يجعلها تقاوم الجريان بصورة خاصة. وهكذا يصبح مرور الماء والغازات عبرها صعبا. ونتيجة لذلك، عندما تشق سدادة الصهارة اللزجة طريقها فجأة إلى السطح على طول شق شاقولي، تميل المواد التي تحتها بضغطها المرتفع إلى الانفجار بعنف أكثر من أن تتدفق ببطء.

3 يتحطم، في آخر الأمر، سطح الأرض المُجهد عندما تتشكّل منافس انفجارية جديدة حلقة قطرها بقطر حجرة الصهارة. تنهار القطع المتشقّقة من الصخور نحو حجرة الصهارة مجبرة كميات إضافية من الصهارة على الصعود إلى الحافات الخارجية للحلقة. إنّ انطلاق هذه الصهارة المفاجئ يحولّها إلى سحب حارقة واسعة الانتشار من الصخور والرماد البركاني والغاز تعرف **بالتدفق الفتاتي الناري** pyroclastic flow الذي يخرّب مساحة تمتد لعشرات الكيلومترات في جميع الاتجاهات.

4 بعد اندفاع البركان، يستقر فوق حجرة الصهارة ـ المفرّغة جزئيا من محتواها ـ منخفض يشبه فوهة البركان يعرف **بالكلديرا** caldera أو فوهة البركان الضخمة. إن الأراضي المنهارة في داخل حجرة الصهارة تبدأ مع مرور الزمن بالانصهار. وبذلك تتشكّل كتلة أصغر من الصهارة، التي تشكّل مع قوى أخرى قبة في مركز الكلديرا. يمكن أن تتسرب من هذه المنطقة لابة (حمم بركانية) بطيئة الحركة مرات متعددة قبل أن تتجمّع الصهارة بصورة كافية لتحفيز اندفاع ضخم جديد.

تؤدّي إلى إغلاق المطارات وإنقاص الإنتاج الزراعي على نحو خطر.

وتدريجيا فقط يمكن أن تغسل الأمطار (التي أصبحت حامضية بالغازات البركانية) الغطاء الثخين من الرماد البركاني وتجرفه. وبسبب عوم الصخور البركانية والرماد البركاني قد تُسدُّ الممرات المائية الرئيسية. ويمكن أن ينتهي النقل النهري عبر الممرات المائية إلى التوقّف. وبالفعل فقد اخترق حفر بئر نفطية في خليج المكسيك طبقة ثخينة بصورة غير متوقعة من حطام صخري بالقرب من دلتا نهر المسيسيبي نتج من اندفاعات لبراكين عملاقة ـ وهي تمتد على مسافة تزيد على 1000 ميل في موقع بلوستون. فقد أمكن تراكم هذه الكمية من الحطام الصخري البركاني الناجمة عن بركان بعيد جدا بعد عومها وانتقالها نحو مصب النهر، ومن ثم التصاقها بالرواسب التي في قاع المحيط.

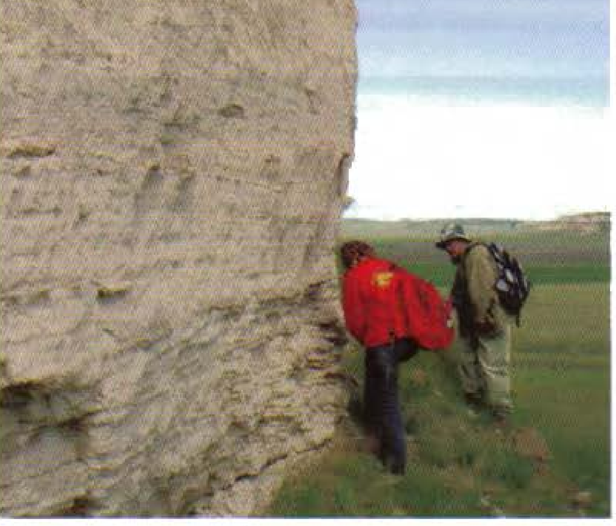
لقد كان لدى الباحثين أسبابهم للاعتقاد أنّ عواقب أخرى قد تنشأ عن انطلاق أحجام كبيرة من غاز، بقي تركيبه غير معروف تماما، نحو الغلاف الجوي الأعلى للأرض، وإمكانية استمرار انطلاقه لسنوات متعددة. وتشير الأبحاث الجديدة إلى أنّ بعض هذه النتائج قد لا تكون مؤذية مثل ما كان يُخشى من قبل. ولكن يمكن لبعضها الآخر أن يكون أكثر أذى. وهذا ما توضّح مرة ثانية حالما تمت دراسة تركيب النواتج الثانوية الصغيرة من الاندفاعات البركانية الماضية.

من الغازات المتنوعة التي تؤلف أي اندفاع بركاني، يسبِّب ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2) التأثير الأقوى في البيئة: فهو يتفاعل مع الأكسجين والماء لإنتاج قطيرات دقيقة من حمض الكبريت (H_2SO_4). وتشكّل هذه القطيرات المصدر الرئيسي الذي يحجب الشمس ويؤدّي إلى التبرّد المناخي المفاجئ الذي قد يسيطر على الكرة الأرضية بعد الاندفاعات البركانية الكبيرة. ومن المعروف أنّ الدورة المائية (الهدرولوجية) على الكرة الأرضية تأخذ أشهر أو سنين لتغسل وتزيل القطيرات الحامضية بصورة كاملة. والكثير من الباحثين يقدّر تقديرات غامضة أنّ **فصول شتاء بركانية** volcanic wintres قد تدوم عشرات السنوات إذا لم تدم مئات السنين. ولكن في السنوات الأخيرة كشف باحثون آخرون عن دليل يخفّض كثيرا هذه المدة.

يُحتجز معظم آثار حمض الكبريت تقريبا الناتج بعد الاندفاعات البركانية الكبيرة في الثلج والجليد كلّما انفصل هذا الحمض عن الغلاف الجوي الملوّث. فقد وجد الباحثون في عام 1996، الذين يدرسون لبابات الجليد المأخوذة من كرينلند وقارة القطب الجنوبي (قارة الأنتاركتيكا)، أنّ كمية حمض الكبريت القصوى حصلت بعد الاندفاع البركاني الكبير في موقع «طوبا» قبل 74 000 سنة. فقد قذف هذا الاندفاع 2800 كم³ من اللابة والرماد البركاني وأدّى إلى خفض متوسط درجة حرارة الكرة الأرضية بين 5 و 15



تشكّل الرواسب البركانية الواسعة الانتشار منحدرا شديد الانحدار في الجبل Yucca Mountain بنيفادا. وهي بقايا تدفقات من الرماد البركاني الحارق الناتج من الاندفاعات العملاقة التي انطلقت في الجوار قبل نحو 12.8 مليون سنة (*الطبقة السفلى*) وقبل نحو 12.7 مليون سنة (*الطبقة العليا*).



يتشكّل الجدار الصلب في غرب نبراسكا المؤلّف من صخر رمادي اللون من تراكم رماد بركاني خانق تخلّف عن اندفاع كبير من موقع غير معروف قبل نحو 28 مليون سنة. تدل عناصر في الرماد البركاني على أنّ مثل هذه الاندفاعات الكبيرة يمكن أن تغيّر كيميائية طبقة الاستراتوسفير(1) stratosphere.

درجة مئوية. ومن دون شك، كانت نتائج هذه البرودة خطرة، غير أنّها لم تدم مدة طويلة كما كان يُعتقد من قبل. لقد اختفى حمض الكبريت من لبابات الجليد بعد ست سنوات؛ أو بعد مدة أقل من ذلك بحسب بعض الباحثين الآخرين.

إنّ احتمال كون مدة «فصول الشتاء البركانية» أقصر ممّا كان يعتقد هي أخبار سارّة. ولكن طريقة جديدة جرى تطويرها خلال السنوات الخمس الأخيرة لدراسة تركيب ذرات الأكسجين في الأمطار الحمضية البركانية كشفت عن وجود إشارة منذرة بالخطر مختلفة تماما حول التأثيرات المديدة لثنائي أكسيد الكبريت في الغلاف الجوي. ولكي يتحول الغاز SO_2 إلى الحمض H_2SO_4 لا بد أن يتأكسد ـ وبتعبير آخر ينبغي أن يكتسب ذرتين من الأكسجين من مركّبات أخرى موجودة بالفعل في الغلاف الجوي. فالمركبات التي تؤدي بالفعل الدور الأساسي هي موضوع لا يزال قيد المناقشة الحامية في الأبحاث الحالية. وهكذا عندما بدأت العمل مع <M. إيلر> [في هيئة الباحثين بمعهد كاليفورنيا للتقانة] في عام 2003، بحثنا عن دليل في العينات التي أخذتها من طبقات الرماد البركاني الناتجة من الاندفاعات البركانية القديمة في موقعي «بلوستون» و «لونگ ڤالي».

بدأنا بتحليل عيناتنا بالتركيز بصورة خاصة على مؤكسد فعّال هو الأوزون. غاز مؤلّف من ثلاث ذرات من الأكسجين أكثر ما يُعرف عنه أنّه يقي الكرة الأرضية من أشعة الشمس فوق البنفسجية الخطرة. وبسبب التحوّلات الكيميائية النادرة التي تتعرّض لها بعض الغازات بوجود ذلك الإشعاع الشمسي الشديد، يتميّز غاز الأوزون بشذوذ فيما يسمّى بصمة أكسجين نظيره 17 (^{17}O) المستقلة عن كتلته، التي، بمعنى آخر، يمكن أن تعتبر زيادة من الأكسجين 17.

عندما يتفاعل الأوزون أو أي جزيء آخر غني بالأكسجين في طبقة الاستراتوسفير من الغلاف الجوي، مع الغاز SO_2، ينقل بصمة نظير أكسجينه 17 إلى الحمض الناتج ـ وهذا يعني أنّ شذوذ الأكسجين 17 يستمر في الحمض الجديد. لقد وجد الجيوكيميائيون في عام 2003 الذين يعملون في جامعة كاليفورنيا بسان دييگو، الدليل المذكور آنفا، ما يدلّ على

(1) طبقة في غلاف الأرض الجوي تمتد من 11 كم حتى 50 كم فوق سطح الأرض. (التحرير)

تتكشّف حاليا هياكل الحيوانات التي كانت مدفونة في التشكيلة Ashfall Fossil Beds (طبقات أحافير الرماد البركاني)، المتشكّلة نتيجة اندفاع كارثي في ولاية إيداهو قبل 12 مليون سنة، في المتنزّه State Historical park بولاية نبراسكا. ومن المحتمل أن تكون معظم الحيوانات قد ماتت ببطء عندما ملأ الرماد البركاني (الذي يتألّف بصورة أساسية من دقيق زجاجي) رئاتها وسحج أسنانها؛ ويمكن أن تكون المواد الكيميائية في الرماد البركاني قد سمّمت أيضا مياه شربها.

تخريب طبقة الأوزون(*)

تحاليل عينات الكبريتات

ظهرت الغازات الخطرة المنبعثة من البركان Mount Pinatubo في الفليبين عام 1991 كألوان في صور الساتل(1) المأخوذة لغلاف الأرض الجوي الأعلى (*خلفية الصورة*). يشير دليل جديد إلى أنّ مثل هذه الغازات المنبعثة من البراكين العملاقة في المستقبل يمكن أن تستنفد إلى حد بعيد طبقة الأوزون الواقية لكوكب الأرض، قبل أن تسقط على شكل أمطار حمضية وتختلط مع الرماد البركاني لتشكّل الكبريتات. تتضمّن عينات الكبريتات المأخوذة من رواسب أربعة براكين عملاقة زيادة استثنائية في نظير الأكسجين 17 (O_{17}) (تمثّل المساحات الملوّنة غير المنتظمة في المخطط مجموعات من القياسات)؛ تحدث هذه الزيادة فقط في المركبات التي اكتسبت الذرات النادرة خلال التفاعلات مع غازات خاصة، على الأرجح غاز الأوزون، في الطبقة العلوية من غلاف جو الكرة الأرضية. إنّ المواد التي تتشكل على سطح الأرض وتبقى هناك، مثل منتجات معظم الاندفاعات الصغيرة لا تشير إلى مثل هذه الحالة الشاذة (*الخط الأزرق*).

أنّ هذه البصمة تكون محفوظة أيضا في ذرات أكسجين الحمض الذي يسقط فيما بعد كأمطار وفي مركبات الكبريتات التي تتشكّل عندما تتفاعل الأمطار الحمضية مع الرماد البركاني على الأرض.

وتدل زيادة الأكسجين 17 والمركبات الكيميائية الأخرى التي وجدناها في كبريتات عينات الرماد البركاني المأخوذة من موقعي «يلوستون» و «لونگ ڤالي» على أنّ كميات كبيرة من أوزون طبقة الاستراتوسفير استخدمت في التفاعلات مع غازات الاندفاعات البركانية الكبيرة التي انطلقت من الموقعين المذكورين. وبيّن باحثون آخرون يدرسون طبقات الحمض في لبابات الجليد من مناطق قارة القطب الجنوبي أنّ تلك الأحداث أدّت أيضا على الأرجح إلى تآكل أوزون الاستراتوسفير، وهذا يجعلنا نفكر كما لو أنّ انبعاثات البراكين العملاقة تستغرق مدة أطول لتآكل ثقوب طبقة الأوزون ممّا تستغرق لتبريد المناخ.

قد يكون هذا النقص في طبقة الأوزون الواقية متوقعا ليفضي إلى كمية متزايدة من الإشعاع فوق البنفسجي الخطر الذي يصل إلى سطح الكرة الأرضية، ومن ثم إلى زيادة الضرر **الجيني** genetic الذي تسببه هذه الأشعة. ومع ذلك فإنّ حجم ومدة تدمير طبقة الأوزون المحتمل مازالا خاضعين للنقاش. ومع ذلك فقد كشفت الملاحظات الفضائية أنّ استنفادا في طبقة الأوزون يراوح ما بين 3 و 8 في المئة، حصل بعد اندفاع بركان ماونت بيناتوبو عام 1991 في الفليبين. ولكن ماذا قد يحصل بعد حدث أضخم بمئة مرة؟ إنّ مجرد حساب بسيط لن يؤدّي إلى حلّ هذه المشكلة، بسبب تعقيد تفصيلات تفاعلات الأكسدة في الغلاف الجوي وعدم فهمها تماما.

ويُجرى حاليا تطوير تقنيات علمية لدراسة ومراقبة البراكين من جميع الحجوم بسرعة متأنية. وبصرف النظر عن مقدار ما نتعلّمه، لا يمكننا أن نمنع حدوث أي اندفاع بركاني. وما يمكن أن يقال حول آثار معظم الأحداث الكارثية يبقى غير نهائي في أحسن الأحوال. ومع ذلك فإنّ الأخبار السارة هي أنّ الباحثين يعرفون حاليا بصورة كافية مواقع الاندفاعات البركانية المحتملة كي يتنبؤوا بتأكيدات معقولة أنّه لن تحصل مثل هذه الكوارث في القريب العاجل. ■

(*) OZONE DESTRUCTION
(1) أو القمر الصنعي

المؤلف

Ilya N. Bindeman

جيوكيميائي ومساعد أستاذ في قسم العلوم الجيولوجية بجامعة أوريگون. ولد في موسكو واهتمّ في البداية بعلم البراكين عندما درس البراكين البعيدة في كامشاتكا في أقصى شرق روسيا. وبعد أن حصل على الدكتوراه من جامعة شيكاگو في عام 1998 بدأ بصورة عملية بفحص البلورات الميكروية الموجودة في الرماد البركاني بغية إيجاد أدلة تدل على منشأ الاندفاعات البركانية الكبيرة في العالم وتأثيراتها. عمل في جامعة ويسكونسين-ماديسون وفي معهد كاليفورنيا للتقانة قبل أن ينضم إلى كلية أوريگون في الشهر 12 من عام 2004 ويقيم مختبره الخاص في الجيوكيمياء.

مراجع للاستزادة

Low-$\delta^{18}O$ Rhyolites from Yellowstone: Magmatic Evolution Based on Analyses of Zircons and Individual Phenocrysts. Ilya N. Bindeman and John W. Valley in *Journal of Petrology*, Vol. 42, pages 1491–1517; 2001.

Sulfate Oxygen-17 Anomaly in an Oligocene Ash Bed in Mid-North America: Was It the Dry Fogs? Bao Huiming, Mark H. Thiemens, David B. Loope and Xun-Lai Yuan in *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, pages 1843–1846; 2003.

Rare Sulfur and Triple-Oxygen Isotope Geochemistry of Volcanogenic Sulfate Aerosols. Ilya N. Bindeman, John M. Eiler, Boswell Wing and James Farquhar in *Earth and Planetary Science Letters* (in preparation, 2006).

Scientific American, June 2006

البحث من أجل صنع عدسة فائقة(*)

سوف يكون بإمكان عدسة فائقة مصنوعة من «مواد مرفّعة»(1) ذات خواص مثيرة للجدل أن تشكل أخيلة تتضمن تفصيلات أدق من الطول الموجي للضوء المستخدم.

<J. B. بندري> ـ <D. R. سميث>

قبل نحو 40 عاما كانت لدى العالم الروسي <V. فيسيلاكو> فكرة حول مادة ربما استطاعت قلب عالم البصريات رأسا على عقب. فهي قد تستطيع جعل موجات الضوء تبدو أنها تجري *إلى الخلف* وأنها تسلك سلوكا آخر بطرق عديدة معاكسة للحدس. وسوف يكون لنوع جديد كليا من العدسات مصنوع من هذه المادة صفات شبه سحرية تجعلها تتفوق على أية عدسات معروفة سابقا. والفكرة هنا هي أنه ينبغي أن يكون للمادة **قرينة انكسار** index of refraction سالبة (يصف «الانكسار» مقدار تغير اتجاه الموجة لدى دخولها أو خروجها من المادة). إن لجميع المواد المعروفة قرينة انكسار موجبة. وقد فشل <فيسيلاكو>، بعد سنين من البحث، في إيجاد أي شيء له الخواص الكهرمغنطيسية التي كان ينشدها، وتلاشى بذلك حدسه غارقا في الظلمة.

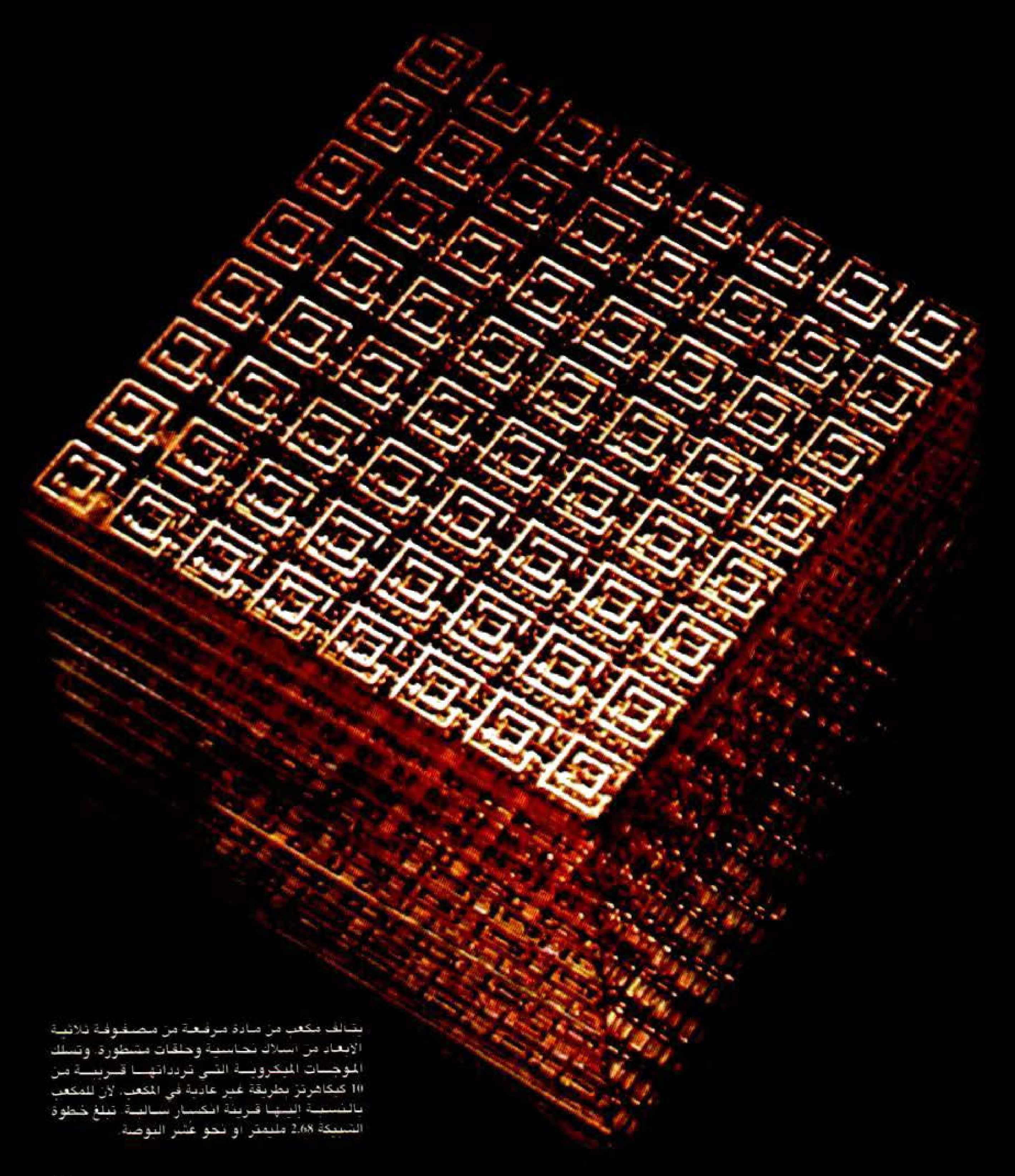
وقد أحيا مؤخرا تقدم هائل مفهوم <فيسيلاكو>. فالخواص الكهرمغنطيسية لمعظم المواد تنشأ مباشرة عن مميزات الذرات والجزيئات التي تكوّن هذه المواد. ولما كان لهذه المكوّنات مجال محدود من المميزات فإن ملايين المواد التي نعرفها لا تبدي إلا مدى محدودا فقط من الخواص الكهرمغنطيسية. ولكن في منتصف التسعينات أدرك أحدنا (بندري)، بالتعاون مع علماء الشركة ماركوني لتقانة المواد Marconi Materials Technology في إنكلترا، أنه ليس من الضروري أن تكون «مادة» ما **شريحة** slab من مكوّن واحد، وإنما يمكن أن تكتسب خواصها الكهرمغنطيسية من بنى دقيقة تكوّن مجتمعة تأثيرات تكون مستحيلة لولا ذلك.

بدأ فريق الشركة ماركوني يصنع ما يسمى **المواد المرفّعة** metamaterials وبيّن أن عددا منها يبعثر الموجات الكهرمغنطيسية بصورة مخالفة لأي مواد معروفة. وفي عام 2000 وجد واحد منا (سميث) مع زملائه [من جامعة كاليفورنيا في سان دييكو] تركيبة من المواد المرفّعة توافر خاصة الانكسار السالب المراوغة.

يسلك الضوء في المواد ذات قرينة الانكسار السالبة سلوكا شديد الغرابة، لدرجة أنه كان لزاما على النظريين أن يغيروا تماما العديد من مفاهيم الكهرمغنطيسية. وقد تضمنت هذه العملية بعض المناظرات الحارة التي تطرح السؤال حول وجود مثل هذه المواد أصلا. وفي الوقت نفسه يعمل التجريبيون على تطوير تقانات تستخدم الخواص الغريبة للمواد المرفعة: عدسة فائقة، على سبيل المثال، تتيح تصوير تفصيلات أدق من طول موجة الضوء المستخدم. وهذه يمكن أن تمكن **الطباعة الحجرية الضوئية** optical lithography للدارات الإلكترونية الميكروية من الوصول إلى المقياس النانوي ومن تخزين مقدار أكبر كثيرا من البيانات على الأقراص الضوئية. ويبقى هناك الكثير مما ينبغي عمله لتحويل هذه التصورات إلى حقيقة. أما الآن وقد تحقق حلم <فيسيلاكو> بصورة نهائية فإن التقدم أصبح سريعا.

(*) THE QUEST FOR THE SUPERLENS

(1) metamaterials، أو مواد فوقية.



يتألف مكعب من مادة مرفعة من مصفوفة ثلاثية الأبعاد من أسلاك نحاسية وحلقات مشطورة. وتسلك الموجات الميكروية التي تردداتها قريبة من 10 كيكاهرتز بطريقة غير عادية في المكعب، لأن للمكعب بالنسبة إليها قرينة انكسار سالبة. تبلغ خطوة الشبكة 2.68 مليمتر أو نحو عشر البوصة.

الانكسار السالب(*)

لا بد لكي يفهم المرء كيف يمكن أن ينشأ الانكسار السالب من أن يعرف كيف تؤثر المواد في الموجات الكهرمغنطيسية. حين تسير موجة كهرمغنطيسية (مثل شعاع من الضوء) عبر مادة ما، تتأثر الإلكترونات الموجودة ضمن ذرات أو جزيئات هذه المادة بقوة فتتحرك تبعا لذلك. وتستهلك هذه الحركة بعضا من طاقة الموجة، وهذا يؤثر في خواص الموجة وفي طريقة انتشارها. ويستطيع العلماء، بواسطة تعديل تركيب المادة الكيميائي، ضبط مميزات انتشارها من أجل تطبيق معين ضبطا دقيقا.

ولكن كما تبين المواد المرفّعة، ليست الكيمياء الطريق الوحيد لتطوير مواد ذات استجابة كهرمغنطيسية مشوّقة؛ إذ يمكن كذلك تصميم استجابة كهرمغنطيسية بواسطة تكوين بنى دقيقة إنما ماكروية (جهرية). وينشأ هذا الإمكان لأن الطول الموجي لموجة كهرمغنطيسية عادية - وهي المسافة المميزة التي تتغير فيها الموجة - يفوق بعدة مراتب كِبَر الذرات أو الجزيئات التي تتشكل منها المادة. فالموجة لا «ترى» جزيئا مفردا وإنما ترى الاستجابة الجماعية لملايين الجزيئات. وفي مادة مرفّعة تكون عناصرها المكوِّنة أصغر كثيرا من الطول الموجي ولذلك لا ترى الموجة الكهرمغنطيسية هذه العناصر مفردا.

تحوي الموجات الكهرمغنطيسية، كما تدل تسميتها، على كلا الحقلين: الكهربائي والمغنطيسي. وكل حقل يحرّض حركة مميزة للإلكترونات في المادة - ذهابا وإيابا استجابة للحقل الكهربائي، وبصورة دائرية استجابة للحقل المغنطيسي. وهناك **وسيطان** parameters يحددان مدى هاتين الاستجابتين في مادة ما: **السماحية الكهربائية** (ε) electrical permittivity أو مقدار استجابة الإلكترونات للحقل الكهربائي، و**النفوذية المغنطيسية** magnetic permeability (μ)، أي درجة استجابة الإلكترونات للحقل المغنطيسي. ولأغلب المواد وسيطان ε و μ موجبان.

والمؤشر المهم الآخر للاستجابة الضوئية للمادة هو قرينة انكسارها (n). وترتبط قرينة الانكسار ببساطة بكل من الوسيطين ε و μ: $n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu}$. وينبغي اختيار القيمة الموجبة للجذر التربيعي من أجل جميع المواد المعروفة؛ ولذلك فقرينة الانكسار موجبة. ولكن «فيسيلاكو» بيّن في عام 1968 أنه إذا كانت قيمة كل من الوسيطين ε و μ سالبة وجب أن تأخذ قرينة الانكسار n الإشارة السالبة نفسها. ولذلك فإن مادة ذات وسيطين ε و μ سالبي القيمة هي مادة ذات قرينة انكسار سالبة.

وتقتضي القيمة السالبة لأي من الوسيطين ε أو μ أن تتحرك الإلكترونات الموجودة في المادة بعكس اتجاه القوة المطبقة عليها من قبل الحقلين الكهربائي والمغنطيسي. ومع أن هذا السلوك يمكن أن يبدو مفارقة، فمن البساطة بمكان أن تُجعل الإلكترونات تعاكس «دفعة» الحقلين الكهربائي والمغنطيسي المطبقين عليها.

تخيل أرجوحة: طبِّق دفعا بطيئا ثابتا، فتتحرك الأرجوحة طواعية باتجاه الدفع - مع أنها لا تتأرجح عاليا جدا. ولكن بمجرد أن تبدأ الحركة، تنزع الأرجوحة للتأرجح ذهابا وإيابا بمعدل معين يُعرف تقنيا **بالتردد التجاوبي** resonant frequency الخاص بها. قم بدفع الأرجوحة بصورة دورية متزامنة مع هذا التأرجح فتبدأ ترتفع للأعلى أكثر فأكثر. والآن حاول أن تدفع الأرجوحة بمعدل أسرع فيصبح هذا الدفع غير متفق في الطور مع حركة الأرجوحة - وعند نقطة معينة قد تكون ذراعاك ممدودتين فيما الأرجوحة مندفعة باتجاهك. وإذا كنت تابعت الدفع لفترة، ربما أصبح للأرجوحة اندفاع كاف لدفعك ورميك - فهي عندئذ تدفعك إلى الخلف. وبالطريقة نفسها تخرج الإلكترونات في مادة ذات قرينة انكسار سالبة عن التوافق في الطور وتقاوم «دفعة» الحقل الكهرمغنطيسي.

المواد المرفّعة(***)

التجاوب resonance، أي النزعة للاهتزاز بتردد معين، هو المفتاح للوصول إلى هذا النوع من الاستجابة السالبة. وهو يدخَل صنعيا في مادة مرفّعة بواسطة بناء دارات صغيرة مصممة لتقلد الاستجابة المغنطيسية أو الكهربائية لمادة ما. ففي **مجاوب ذي حلقات مشطورة** split-ring resonator (SSR) على سبيل المثال يحرِّض التدفق المغنطيسي الذي يخترق الحلقات المعدنية تيارات تدور في الحلقات، مشابهة للمغنطيسية في المواد [*انظر الإطار في الصفحة 64*]. وبالمقابل يحرض الحقل الكهربائي في شبكة أسلاك معدنية مستقيمة تيارات تجري ذهابا وإيابا.

إذا تُركت الإلكترونات في هذه الدارات وشأنها تأرجحت بصورة طبيعية إلى الأمام والخلف وفق التردد التجاوبي الذي تحدده بنية الدارة وأبعادها. طبّق حقلا تردده تحت هذا التردد فتنتج استجابة موجبة عادية. أما فوق تردد التجاوب مباشرة فتكون الاستجابة سالبة - تماما كما دَفعتْ الأرجوحة إلى الخلف عندما صارت تُدفع بأسرع من ترددها. فيمكن للأسلاك إذًا توفير استجابة كهربائية سالبة مع وسيط ε سالب فوق مجال معين من الترددات، في حين تستطيع الحلقات المشطورة توفير استجابة مغنطيسية مع وسيط μ سالب فوق النطاق الترددي ذاته. ليست هذه الأسلاك والحلقات المشطورة سوى عناصر بناء لازمة لصنع تشكيلة واسعة من مواد مرفّعة مشوّقة، بما في ذلك مادة «فيسيلاكو» التي طال البحث عنها.

أتى الدليل التجريبي الأول على إمكان الحصول على مادة ذات قرينة انكسار سالبة من التجارب التي قامت بها مجموعة جامعة كاليفورنيا في عام 2000. وقد استخدمت

(*) Negative Refraction
(**) Overview/ Metamaterials
(***) Metamaterials

نظرة إجمالية/ المواد المرفّعة(**)

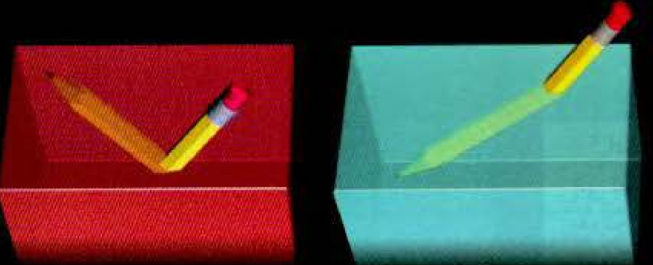
- **يمكن أن تكون المواد مصنوعة من بنى مجهرية مصممة بعناية خواص كهرمغنطيسية لا تشبه أيا من المواد الموجودة في الطبيعة. وبصورة خاصة يمكن أن يكون لهذه المواد المرفّعة قرينة انكسار سالبة، وهذا يعني أنها تكسر الضوء بطريقة جديدة كليا.**
- **يمكن لشريحة من مادة ذات قرينة انكسار سالبة أن تعمل مثل عدسة فائقة قادرة على منافسة العدسات الحالية ذات القرينة الموجبة. وسيكون بإمكان مثل هذه العدسة الفائقة تشكيل أخيلة تحتوي على تفاصيل أدق مما يسمح به حد الانعراج الذي يحد من أداء كافة العناصر البصرية ذات القرينة الموجبة.**
- **مع أن أغلب التجارب على المواد المرفّعة تُجرى بالموجات الميكروية، فمن الممكن أن تستخدم في المستقبل الأطوال الموجية الأقصر، تحت الحمراء والمرئية.**

غرابة القرينة السالبة(*)

يسلك الضوء (وجميع الإشعاعات الكهرمغنطيسية الأخرى) في وسط ذي قرينة انكسار سالبة سلوكا مختلفا عنه في المواد العادية التي قرينة انكسارها موجبة في عدد من الطرق المخالفة للحدس:

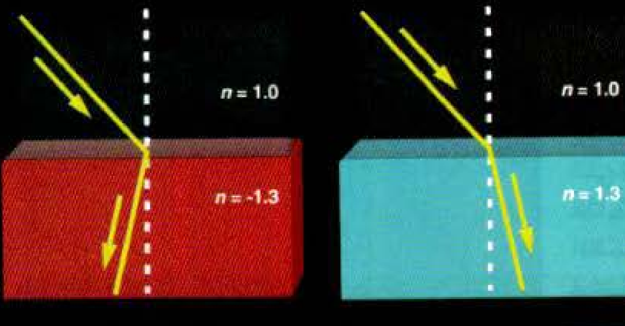
وسط ذو قرينة انكسار موجبة

وسط ذو قرينة انكسار سالبة

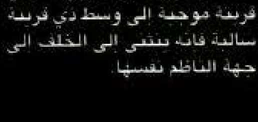


يظهر قلم الرصاص في الماء منثنيا لأن قرينة انكسار الماء أكبر.

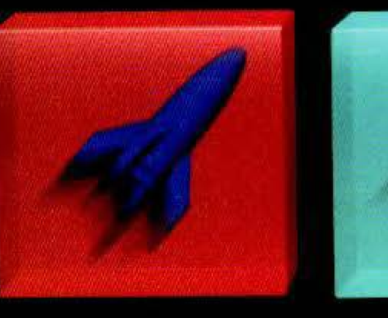
يظهر قلم رصاص مغمور في وسط ذي قرينة انكسار سالبة منثنيا كما لو أنه يخرج من الوسط.



عندما يسير الضوء من وسط ذي قرينة انكسار (n) منخفضة إلى وسط ذي قرينة انكسار أعلى فإنه ينثني نحو الناظم (*الخط المنقط العمودي على السطح*).



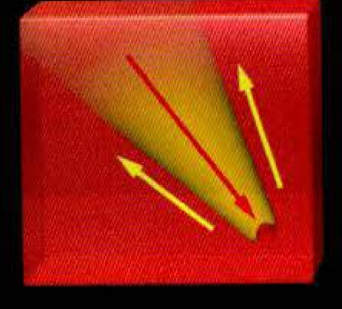
عندما يسير الضوء من وسط ذي قرينة موجبة إلى وسط ذي قرينة سالبة فإنه ينثني إلى الخلف إلى جهة الناظم نفسها.

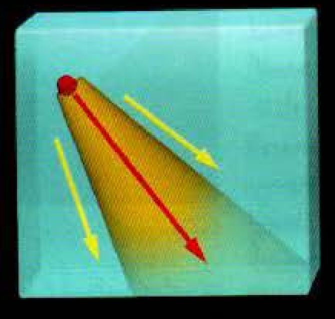




يظهر الجسم المتقهقر(1) أكثر حمرة بسبب مفعول دوبلر.

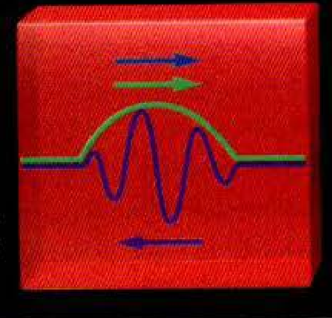
يظهر الجسم المتقهقر أكثر زرقة.





يولد جسم مشحون (الأحمر) يسير بسرعة أكبر من سرعة الضوء مخروطا من إشعاع تشيرنيكوف (الأصفر) باتجاه حركته إلى لأمام.

يكون اتجاه المخروط إلى الخلف.



تسير التموجات المفردة لنبضة كهرمغنطيسية (*البنفسجي*) في وسط ذي قرينة سالبة بالاتجاه نفسه مثل شكل النبضة الإجمالي (الأخضر) والطاقة (الأزرق).



تسير التموجات المفردة بعكس اتجاه شكل النبضة والطاقة.

(1) receding object

(*) NEGATIVE-INDEX WEIRDNESS

هندسة استجابة(*)

المفتاح لإنتاج مادة مرفعة هو تكوين استجابة اصطناعية للحقلين الكهربائي والمغنطيسي.

في مادة عادية

يولد الحقل المغنطيسي (البنفسجي) حركة دائرية للإلكترونات

يولد الحقل الكهربائي (الأخضر) حركة خطية للإلكترونات (الأحمر).

في مادة مرفعة

تتدفق تيارات دائرية في مجاويات الحلقة المشطورة (SRR)

تجري التيارات الخطية (الأسهم الحمراء) في صفيفات الأسلاك

بنية المادة المرفعة

تصنع المادة المرفعة من صفيف أسلاك ومجاويات SRR تكون أصغر من طول الموجات الكهرمغنطيسية التي سوف تستخدم مع المادة.

المجموعة الموجات الميكروية، لأن أكثر المتطلبات صرامة بالنسبة إلى مادة مرفعة هو أن تكون العناصر أصغر بصورة محسوسة من الطول الموجي. ولما كان طول الموجات الميكروية يبلغ عدة سنتمترات، فمن الممكن أن تكون أبعاد عناصر المادة المرفعة عدة مليمترات ـ وهذا مقياس مناسب.

صمم الفريق مادة مرفعة من أسلاك ومجاويات حلقات مشطورة (SRR) متداخلة معا وجمعها على هيئة **موشور** prism. وقد وافرت الأسلاك وسيط ε سالبا ووافرت الحلقات المشطورة وسيط μ سالبا: وكلاهما معا ينبغي أن يعطيا ـ كما فكروا ـ قرينة انكسار سالبة. وشكلوا كذلك، للمقارنة، موشورا مماثلا من التفلون Teflon، وهو مادة ذات قرينة انكسار موجبة قيمتها $n = 1.4$. وجّه الباحثون حزمة من الموجات الميكروية إلى وجه الموشور وكشفوا مقدار الموجات الميكروية البارزة وفق زوايا مختلفة. وكما هو متوقع، عانت حزمة الموجات الميكروية انكسارا موجبا من موشور التفلون ولكنها انكسرت انكسارا سالبا على موشور المادة المرفعة. أصبحت تكهنات «فيسيلاكو» حالياً حقيقة: فقد تم التوصل أخيرا إلى مادة ذات قرينة انكسار سالبة. أو هل تم ذلك فعلا؟

هل تَعمل حقا؟(**)

أدت تجارب جامعة كاليفورنيا، إضافة إلى تنبؤات جديدة رائعة كان الفيزيائيون يقومون بها حول المواد ذات قرينة الانكسار السالبة، إلى موجة عارمة من اهتمام الباحثين الآخرين. لم يدقق المجتمع العلمي في زمن فرضية «فيسيلاكو» الذي لم تكن توجد فيه مواد مرفعة، تدقيقا كافيا في مفهوم الانكسار السالب. أما الآن ومع إمكان أن تحقق المواد المرفعة الأفكار المقحمة التي تتضمنها هذه النظرية، فقد أولى الباحثون اهتماما أكبر بالموضوع. وبدأ المشككون يتساءلون ما إذا كانت المواد ذات قرينة الانكسار السالبة تخرق القوانين الأساسية للفيزياء. فإذا كانت كذلك، أصبح برنامج البحث كله باطلا.

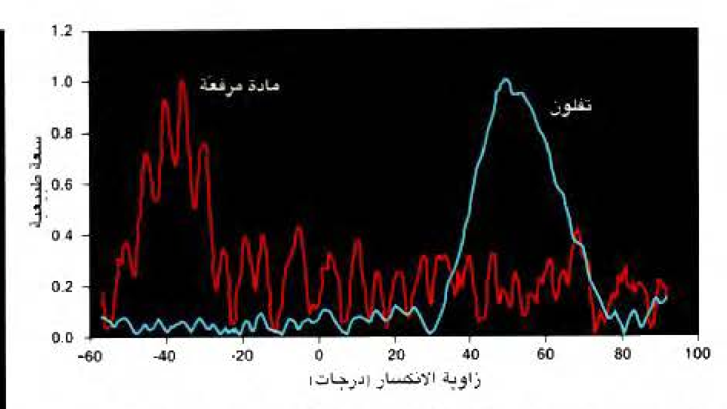
تركزت أعنف المناقشات حول فهمنا لسرعة الموجة في مادة معقدة. يسير الضوء، في الخلاء، بأقصى سرعة له وهي 300 000 كيلومتر في الثانية. ويُرمز لهذه السرعة بالحرف c. أما سرعة الضوء في مادة ما فهي أخفض بمعامل مقداره قرينة الانكسار، أي أن السرعة $v = c/n$. ولكن ماذا لو كانت القرينة n سالبة؟ إن التفسير البسيط لعلاقة سرعة الضوء هو أن الضوء ينتشر إلى الخلف.

أما الجواب الأكمل فيأخذ بالاعتبار أن للموجة سرعتين، تدعيان سرعة الطور وسرعة المجموعة. ولفهم هاتين السرعتين لنتخيل نبضة ضوئية تسير عبر وسط ما. إن للنبضة شكلا مشابها لذلك المبين في *الرسم الأخير في إطار الصفحة 63*. تتزايد تموجات الموجة إلى حدها الأقصى في مركز النبضة ثم تعود فتتناقص بعده حتى تتلاشى. وسرعة الطور هي سرعة التموجات المفردة. أما سرعة الموجة فهي السرعة التي يتقدم بها شكل النبضة. وهاتان السرعتان ليستا بالضرورة متساويتين.

وتكون سرعتا المجموعة والطور في مادة ذات قرينة سالبة، كما اكتشف «فيسيلاكو»،

(*) ENGINEERING A RESPONSE

(**) Does It Really Work?



أكدت التجربة التي أجريت في الشركة بوينك فانتوم بسياتل باستخدام موشور من مادة مرفعة أولا ثم من موشور من التفلون (ذي القرينة الموجبة) ظاهرة الانكسار السالب. فقد كسر التفلون الموجات الميكروية بزاوية موجبة (*الخط الأزرق*): أما المادة المرفعة فبزاوية سالبة (*الخط الأحمر*).

مكشاف
موشور
عدسة
ذراع دوارة
مرسل ميكرومو جي

متعاكستين في الاتجاه. ومن الغريب أن التموجات المفردة للنبضة تسير إلى الخلف وحتى لو كان شكل النبضة كله يسير إلى الأمام. إن لهذه الحقيقة أيضا نتائج مدهشة في حالة حزمة مستمرة من الضوء، مثل تلك التي تصدر عن مصباح ومضي مغمور كليا في مادة ذات قرينة سالبة. فلو كان بإمكانك مراقبة التموجات المفردة للموجة الضوئية لكنت رأيتها تخرج من هدف الحزمة وتسير إلى الخلف على طول الحزمة ثم تختفي في النهاية داخل المصباح الومضي كما لو كنت تشاهد فيلما يُعرض بالعكس. مع أن طاقة الحزمة الضوئية تسير إلى الأمام مبتعدة عن المصباح، تماما كما هو متوقع. وذلك هو الاتجاه الذي تسير الحزمة وفقه، على الرغم من حركة التموجات المذهلة نحو الخلف.

ليس من السهل عمليا دراسة التموجات المفردة لموجة ضوئية، كما أن تفاصيل النبضة يمكن أن تكون معقدة للغاية. ولذلك غالبا ما يلجأ الفيزيائيون إلى حيلة بارعة لتوضيح الفرق بين سرعتي الطور والمجموعة. فإذا جمعنا معا موجتين مختلفتي الطول الموجي تسيران في الاتجاه نفسه تداخلت الموجتان وولدتا شكلا **خفقانيا** beat. والخفقات تسير بسرعة المجموعة.

لاحظ «M .P. فالانجو» وزملاؤه [في جامعة تكساس باوستن] شيئا مثيرا للفضول عند تطبيق هذا المفهوم على اختبارات جامعة كاليفورنيا المتعلقة بالانكسار التي أجريت عام 2002. فحين تنكسر موجتان طولاهما الموجيان مختلفان عند السطح الفاصل بين مادة ذات قرينة سالبة وأخرى ذات قرينة موجبة فإنهما تنكسران بزاويتين مختلفتين بعض الشيء. أما شكل الخفقان الناتج فبدل أن يتبع الحزم المنكسرة انكسارا سالبا يبدو أنه يخضع بالفعل لانكسار موجب. وبمساواة شكل الخفقان هذا مع سرعة المجموعة استنتج الباحثون في تكساس أن أي موجة يمكن تحقيقها فيزيائيا سوف تخضع لانكسار موجب. فعلى الرغم من إمكان وجود مادة ذات قرينة سالبة، فإن الانكسار السالب كان مستحيلا.

إذا افترضنا أن ما توصل إليه الفيزيائيون في تكساس كان صحيحا، فكيف يمكن للمرء أن يفسر نتائج تجارب جامعة كاليفورنيا؟ لقد عزا «فالانجو» والعديد من الباحثين الانكسار السالب الظاهري إلى مجموعة من الظواهر الأخرى المختلفة. فربما امتصت العيّنة بالفعل قدرا كبيرا من الطاقة لدرجة أن الموجات لم تستطع أن تتسرب إلا من الجانب الضيق للموشور متنكرة بهيئة موجات منكسرة انكسارا سالبا؟ وفي نهاية المطاف كانت عينة جامعة كاليفورنيا ذات امتصاص ذي شأن. والقياس لم يؤخذ عند مسافة بعيدة جدا عن وجه الموشور. وهذا يجعل نظرية الامتصاص هذه إمكانا محتملا.

سببت هذه الاستنتاجات قلقا كبيرا لأنها يمكن أن لا تؤدي إلى إبطال تجارب جامعة كاليفورنيا فقط، وإنما إلى إبطال جميع الظواهر التي تنبأ بها «ڤيسيلاكو» أيضا. وبعد شيء من التفكير أدركنا، على أي حال، أنه كان من الخطأ الاعتماد على شكل الخفقان دليلا على سرعة المجموعة. وقد استنتجنا أن شكل التداخل الناتج لموجتين تسيران باتجاهين مختلفين يفقد علاقته بسرعة المجموعة.

وبمجرد أن بدأت حجج النقاد تنهار أتت تأكيدات تجريبية أخرى حول الانكسار السالب. فقد كررت مجموعة «M. تانيليان» [في بوينك فانتوم Boeing Phantom Works بسياتل] تجارب جامعة كاليفورنيا باستخدام موشور من مادة مرفعة ذات امتصاص منخفض جدا. وكذلك وضع فريق المجموعة بوينك المكشاف على مسافة أبعد كثيرا عن الموشور بحيث يمكن عدم اعتبار الامتصاص في المادة المرفعة السبب في حزمة الانكسار السالب. وأخيرا وضعت الجودة النموذجية للبيانات التي قدمتها مجموعة بوينك والمجموعات الأخرى حدا لأي شكوك باقية حول وجود الانكسار السالب. وأصبحنا منذئذ أحرارا في المضي قدما لاستغلال هذا المفهوم، وإن تكن دقة المواد الجديدة قد بسطته.

ما بعد «ڤيسيلاكو»[1]

بدأنا، بعد انقشاع دخان المعركة، ندرك أن القصة الرائعة التي قصها «ڤيسيلاكو» لم تكن الكلمة الأخيرة حول كيفية سلوك الضوء في المواد ذات القرينة السالبة. وكانت إحدى الأدوات المفتاح رسم الأشعة ــ وهي عملية رسم الخطوط التي تبين الطريق الذي ينبغي أن تسلكه أشعة الضوء، بما في ذلك انعكاسها وانكسارها عند السطح الفاصل بين المواد المختلفة.

إن رسمَ الأشعة تقنيةٌ فعالة تساعدنا، على سبيل المثال، على فهم لماذا تبدو الأشياء في حوض السباحة أقرب إلى السطح مما هي في الواقع، ولماذا يبدو قلم رصاص

(1) Beyond Veselago

نصف مغمور مثنيا. إن هذا يحدث بسبب أن قرينة انكسار الماء (n تساوي تقريبا 1.3) أكبر من تلك التي للهواء، وتنثني أشعة الضوء عند السطح الفاصل بين الهواء والماء. أما قرينة الانكسار فتساوي تقريبا نسبة العمق الحقيقي إلى العمق الظاهري.

يقتضي رسم الأشعة أيضا أن الأطفال الذين يسبحون في حوض ذي قرينة انكسار سالبة سوف يبدون كما لو أنهم يطفون فوق السطح (وهذه صفة قيِّمة من صفات السلامة!) كما أن جميع محتويات الحوض - وحاويته - سوف تبدو كذلك فوق السطح.

استخدم «فيسيلاكو» رسم الأشعة لكي يتنبأ بأن شريحة من مادة سالبة الانكسار، قرينة انكسارها $n = -1$، ينبغي أن تعمل عمل عدسة ذات خواص لا سابق لها. ومعظمنا يعرف جيدا العدسات ذات القرينة الموجبة - في آلات التصوير والعدسات المكبرة والمجاهر والمقاريب (التلسكوبات) ولها جميعها بعد بؤري، حيث يعتمد مكان تشكل الخيال على علاقة بين البعد البؤري والمسافة بين الجسم والعدسة. ويكون الخيال عادة مختلفا بمقاسه عن الجسم، وتعمل هذه العدسات بصورة أفضل عندما تقع الأجسام على المحور المار من العدسة. أما عدسة «فيسيلاكو» فهي تعمل بصورة مختلفة اختلافا كليا عن تلك [انظر الإطار في هذه الصفحة]: إنها أبسط كثيرا، فهي تشكل أخيلة للأجسام المجاورة لها فقط وهي تنقل الحقل البصري بكامله من أحد جانبي العدسة إلى الجانب الآخر.

لقد كانت عدسة «فيسيلاكو» غير عادية، لدرجة أن «بندري» كان مضطرا لأن يتساءل بأي درجة من الكمال يمكن أن تصنع لكي تؤدي وظيفتها. وبصورة خاصة كم سيكون **الميز** resolution النهائي لعدسة «فيسيلاكو»؟ تكون العناصر البصرية ذات القرينة الموجبة مقيدة **بحد الانعراج** diffraction limit لتمييز التفاصيل التي هي من قدِّ الطول الموجي نفسه تقريبا للضوء المنعكس عن الجسم أو أكبر منه. يضع الانعراج الحد النهائي على جميع منظومات التصوير، مثل أصغر جسم يمكن رؤيته بواسطة مجهر أو أقرب مسافة بين نجمين يمكن تمييزها بواسطة مقراب. يحدد الانعراج كذلك أصغر الأشكال التي يمكن إنشاؤها بواسطة عمليات الطباعة الحجرية الضوئية في صناعة الشيپات الميكروية، وبطريقة مشابهة يحد الانعراج من كمِّ المعلومات التي يمكن تخزينها ضوئيا على قرص ڤيديو رقمي (DVD) أو استعادتها منه. ويمكن لطريقة تتفادى حد الانعراج أن تُحدث ثورة في التقانات البصرية، فتتيح للطباعة الحجرية الضوئية الوصول إلى مقاييس نانوية، وربما تسمح كذلك بتخزين بيانات أكثر بمئات المرات على الأقراص الضوئية.

وكان يلزمنا، لمعرفة إذا كانت **البصريات** optics ذات القرينة السالبة تتفوق أو لا على مثيلاتها ذات القرينة الموجبة، أن نتجاوز رسم الأشعة. فتلك المقاربة تهمل الانعراج ولذلك لا يمكن استخدامها للتنبؤ بميْز العدسات ذات القرينة السالبة. وكان علينا، لأخذ الانعراج بالاعتبار، أن نستخدم وصفا أكثر دقة للحقل الكهرمغنطيسي.

العدسة الفائقة(*)

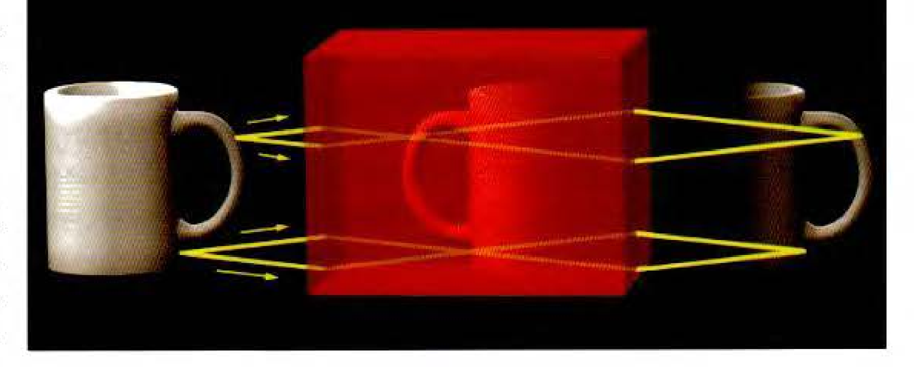
جميع مصادر الموجات الكهرمغنطيسية - سواء كانت ذرات مشعة أو هوائي راديو أو حزمة ضوء بارزة بعد عبورها من خلال فتحة صغيرة - إذا وُصفت بدقة أكبر فهي تُنتج نمطين متمايزين من الحقول: الحقل البعيد والحقل القريب. والحقل البعيد، كما تدل تسميته، هو الجزء الذي يُشعّ بعيدا عن الجسم ويمكن أن يُلتقط بواسطة عدسة لتشكيل خيال. ولكنه، للأسف، لا يحتوي إلا على صورة للجسم كما لو كانت مرسومة بفرشاة عريضة، ذلك أن الانعراج يحد من الميز فلا يتعدى قدّ الطول الموجي. أما الحقل القريب فهو يحتوي على تفاصيل الجسم الدقيقة جميعها، ولكن شدته تتناقص بسرعة مع ازدياد المسافة. وليس للعدسات ذات القرينة الموجبة أي فرصة لالتقاط الحقل القريب الضعيف جدا ونقله إلى الخيال. ولكن الأمر ليس كذلك بالنسبة إلى العدسات ذات القرينة السالبة.

وبالفحص الدقيق للطريقة التي يتأثر بها الحقلان القريب والبعيد لمصدر ما مع عدسة «فيسيلاكو» استنتج «بندري» عام 2000 - وكان ذلك مفاجأة للجميع - أنه يمكن للعدسة، من حيث المبدأ، أن تعيد تبئير كلا الحقلين: القريب والبعيد. فلو كان هذا التنبؤ المذهل صحيحا لعنى ذلك أن عدسة «فيسيلاكو» لا تخضع لحد الانعراج الذي تخضع له جميع البصريات الأخرى المعروفة. وبناء على ذلك سميت الشريحة المستوية ذات القرينة السالبة **عدسة فائقة** superlens.

وقد وجدنا، في تحليل لاحق، مع غيرنا من الباحثين أن ميْز العدسة الفائقة محدود بجودة المادة ذات القرينة السالبة. فأفضل أداء لا يتطلب فقط أن تكون قرينة الانكسار $n = -1$، وإنما أن يكون كل من $\varepsilon = -1$ و $\mu = -1$. والعدسة التي لا تحقق هذه الشروط المثالية تعاني ميزا سيئا إلى حد كبير. وإن تلبية هذين الشرطين في آن واحد هي متطلب أساسي. لكن «A. كربيك» و «G. V. إليفثريادس» [من جامعة تورنتو]

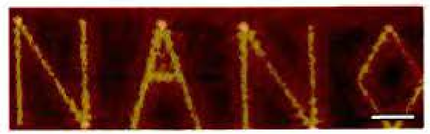
(*) THE SUPERLENS

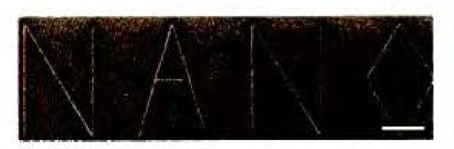
العدسة الفائقة(*)



تشكل شريحة مستطيلة من مادة ذات قرينة سالبة عدسة فائقة. ينكسر الضوء (*الخطوط الصفراء*) الصادر عن الجسم (*في اليسار*) عند سطح العدسة، ثم يتجمع ليشكل خيالا معكوسا داخل الشريحة. ينكسر الضوء مرة أخرى لدى مغادرته الشريحة مشكلا خيالا ثانيا (*في اليمين*). يحتوي الخيال، من أجل بعض المواد المرفّعة، تفاصيل أدق حتى من الطول الموجي للضوء المستخدم، وهذا مستحيل بالنسبة إلى العدسات ذات القرينة الموجبة.







تعمل طبقة من الفضة عمل عدسة فائقة عند مسافات قصيرة جدا. وهنا صُوّرت كلمة "NANO" بواسطة حزمة أيونية مبارة (في اليسار) وضوئيا من دون عدسة فائقة (في الوسط) وكذلك ضوئيا بوجود طبقة من الفضة سمكها 35 نانومتر (في اليمين). يبلغ طول شريط المقياس 2000 نانومتر. باستخدام العدسة الفائقة يكون الميز أدق من الطول الموجي للضوء المستخدم البالغ 365 نانومتر.

بيّنا في عام 2004 تجريبيا أن مادة مرفّعة مصممة بحيث يكون لها $\varepsilon = -1$ و $\mu = -1$ عند الترددات الراديوية، تستطيع بالفعل تمييز الأجسام عند مقياس أصغر من حد الانعراج. وبرهنت نتيجتهم على أنه بالإمكان بناء عدسة فائقة - ولكن هل يمكن بناء عدسة للأطوال الموجية الضوئية الأقصر؟

إن التحدي لجعل المواد المرفعة تناسب الأطوال الموجية الضوئية هو تحدٍّ مضاعف. فأولا، يجب إنقاص أبعاد العناصر المعدنية الموصلة التي تشكل الدارات الميكروية للمادة المرفعة مثل الأسلاك والمجاوبات SRR إلى مقياس النانومتر لكي تكون أصغر من الطول الموجي للضوء المرئي (400 إلى 700 نانومتر). وثانيا، إن الأطوال الموجية القصيرة تقابل الترددات الأعلى، وعند هذه الترددات تسلك المعادن سلوكا أقل شبها بالموصلات، ولذلك فهي تجعل التجاوبات التي تعتمد عليها المواد المرفعة تتخامد. وفي عام 2005 بيّن <C. سوكوليس> [من جامعة ولاية أيوا] و<M. فيكنر> [من جامعة كارلسروه في ألمانيا] تجريبيا أنه يمكن أن تُجعل المجاوبات SRR تعمل عند أطوال موجية صغيرة تساوي 1.5 ميكرون. ومع أن التجاوب المغنطيسي يصبح ضعيفا تماما عند هذه الأطوال الموجية القصيرة، فلايزال ممكنا تشكيل مواد مرفعة مشوّقة.

لكننا مازلنا لا نستطيع صنع مادة يكون لها $\mu = -1$ عند الأطوال الموجية المرئية. ولحسن الحظ هناك حل وسط ممكن. فعندما تكون المسافة بين الجسم والخيال أصغر كثيرا من الطول الموجي يلزم فقط تحقيق الشرط $\varepsilon = -1$، ويمكن عندئذ تجاهل الوسيط μ. وفي العام 2005 فقط قامت مجموعة <R. بلايكي> [من جامعة كانتربري في نيوزيلندا] ومجموعة <X. جانك> [من جامعة كاليفورنيا في بيركلي] بصورة مستقلة باتباع هذه الوصفة وعرضتا مَيْزا **فائقا** superresolution في منظومة بصرية. ويمكن أن تؤدي التجاوبات المتأصلة للمعادن إلى سماحية[1] (ε) سالبة عند الأطوال الموجية الضوئية. وهكذا يمكن لطبقة رقيقة جدا من معدن أن تعمل عمل عدسة فائقة عند طول موجي تكون عنده $\varepsilon = -1$. استخدم كل من <بلايكي> و<جانك> طبقة من الفضة سمكها نحو 40 نانومتر لتصوير ضوء طول موجته 365 نانومتر خارج من فتحات ذات أشكال أصغر من طول موجة الضوء. وعلى الرغم من كون شريحة من الفضة بعيدة عن العدسة المثالية، فإن العدسة الفائقة الفضية حسّنت بصورة جوهرية ميز الخيال، وهذا يبرهن على المبدأ الذي تعمل وفقه العدسات الفائقة.

نحو المستقبل[*]

ليس البرهان على مبدأ العدسات الفائقة سوى الأخير من العديد من التنبؤات التي ينبغي تحقيقها والمتعلقة بالمواد ذات القرينة السالبة - وهذا مؤشر على التقدم السريع الذي حدث في هذا الحقل الناشئ. وقد دفعت آفاق الانكسار السالب الفيزيائيين لإعادة فحص علم الكهرمغنطيسية جميعه تقريبا. وبمجرد أن أصبحت الظواهر الضوئية الأساسية - مثل الانكسار وحدّ الانعراج - مفهومة تماما صارت لديها انعطافات جديدة في سياق المواد ذات القرينة السالبة.

ولايزال قائما ذاك الحاجز أمام ترجمة سحر المواد المرفّعة والمواد ذات القرينة السالبة إلى تقانة قابلة للاستخدام. وستتضمن مثل هذه الخطوة جعل تصميم المواد المرفعة أكثر كمالا وجعل أسعارها مقبولة. وإن المجموعات العديدة التي تعمل حاليا في هذا الحقل تتصدى بقوة لهذه التحديات. ■

(*) Toward the Future
(1) permittivity
(2) quantization of thermal conductivity

المؤلفان

John B. Pendry - David R. Smith

كانا عضوين في فريق الباحثين الذي تشاطر جائزة ديكارت للبحث العلمي لعام 2005 لمساهماتهما في المواد المرفعة. وقد تعاونا على تطوير مثل هذه المواد منذ عام 2000. وكان تركيز <بندري> على البحث النظري و<سميث> على التجارب. <بندري> أستاذ الفيزياء في الكلية Imperial College بلندن، وكان اهتمامه الرئيسي مؤخرا مقتصرا على الظواهر الكهرمغنطيسية، إضافة إلى الاحتكاك الكمومي ونقل الحرارة بين البنى النانوية وتكمية التوصيل الحراري[2]. و<سميث> أستاذ هندسة الكهرباء والحاسوب في Duke University. وقد درس انتشار الموجة الكهرمغنطيسية في المواد غير العادية، ويتعاون حاليا مع عدة شركات لتحديد التطبيقات الجديدة للمواد المرفّعة والمواد ذات القرينة السالبة وتطويرها.

مراجع للاستزادة

Reversing Light with Negative Refraction. John B. Pendry and David R. Smith in *Physics Today*, Vol. 57, No. 6, pages 37–43; June 2004.

Negative-Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. G. V. Eleftheriades and K. Balmain. Wiley-IEEE Press, 2005.

More information on metamaterials and negative refraction is available at
www.ee.duke.edu/~drsmith/

www.cmth.ph.ic.ac.uk/photonics/references.html

esperia.iesl.forth.gr/~ppm/Research.html

www.nanotechnology.bilkent.edu.tr/

www.rz.uni-karlsruhe.de/~ap/ag/wegener/meta/meta.html

Scientific American, July 2006

تأثير برامج الطب العدلي[1] التلفازية في قرارات المحلّفين[*]

لقد شعر المحامون والمحققون والمربّون بمدى تأثير برامج الطب العدلي التلفازية ـ التي تحظى بشعبية واسعة ـ في قرارات المحلفين.

<M M> هوت

كان علم الطب العدلي العمودَ الفقريَّ للروايات البوليسية (التي تُعنى بحل لغز جريمة خفيّة) بدءا من قصص مغامرات دوپان[2] التي كتبها <A E> پو>، مرورا بحكايات <شرلوك هولمز> التي ألفها السير <C A> دويل>، وبمسلسل Quincy الذي قدمه للتلفاز الكاتب <J> كلوكمان>، وصولا إلى برامج الطب العدلي التي تلقى إقبالا باهرا في أيامنا هذه. وقد تنبأت الأساليبُ التي اتبعها المحققُ <شرلوك هولمز> بكثير من التقنيات الحقيقية للربط بين مرتكب الجريمة والأدلة المادية، مثل فحص الدم. وقد اعتُبر علمُ الطب العدلي مهنة في أوائل القرن العشرين، وأصبح مثار اهتمام بالغ للناس في تسعينات القرن الماضي، وذلك إثر الحدث العلمي البارز، ألا وهو تحليل الدنا[3].

وفي هذه الأيام، تحظى ثمانية عروض درامية للطب العدلي بشعبية لم تكن قط تمتلكها سابقا، وهي تتضمن برنامجا يعرض تحقيقا في مسرح الجريمة[4] CSI، وبرامج مرتبطة به. وهي تشغل المراكز العشرين الأولى من بين جميع العروض التي قُدِّمت في الشهر 2005/10. وفي أحد أيام الثلاثاء من ذلك الشهر، كان 27 في المئة من جميع أجهزة التلفزة الأمريكية تعرض البرامج CSI. وكانت قناة تلفازية كبليّة cable تقدم برنامجا يُسمى ملفات الطب العدلي[5]، وهو مسلسل له طابع وثائقي يعرض جرائمَ واقعية وعلماءَ حقيقيين أربعة أيام في الأسبوع. وتترك مثْلُ هذه البرامج انطباعا بأن مختبرات الطب العدلي تعجّ بمجموعة واسعة من الموظفين الذين تلقَّوْا تدريبات متطورة وتستعينُ بقدر كبير من التجهيزات المبنيّة على أحدث التقنيات، وقد أُتيحت لها المواردُ الضرورية لإنهاء كل قضية في الوقت المحدَّد لها.

بيد أن الفجوة بين فهم الناس لهذه الأشياء والحقيقة ما زالت واسعة. ثم إن شعبيةَ هذه العروض أدّتْ إلى تذمُّرات ممَّا أُطلق عليه اسم مفعول البرامج CSI[6]؛ فقد تولَّد لدى الناس انطباع بأن بعض المحامين والقضاة، الذين تتلمذوا على البرامج CSI، الذي ظل يبثُّ على الهواء منذ عام 2000، صاروا يطالبون الآن بمستويات غير معقولة من الأدلة المادية في المحاكمات. أمّا كون مفعول البرامج CSI ذا تأثير قابل للقياس في سلوك قاعة المحكمة، فما زال موضوعا قابلا للنقاش. ومع ذلك، لا شك في أن نشاطات رجال الشرطة تأثرت بالبرامج CSI، إذ صاروا الآن يجمعون قدرا أكبر من الأدلة مما كانت عليه الحال في أي وقت مضى؛ كما تزايدت أُسّيا بعض برامج الطب العدلي، التي تُعْرَضُ في مراكز الأبحاث والأقسام الأكاديمية المختصة. وقد حدث الشيء نفسه في المختبرات المثقلة بأعبائها، وهي تختلف كثيرا عن مراكز التحليل التي تعرض على شاشات التلفاز كقصور مبهرجة تسطع عليها أنوار زرقاء.

مفعول البرامج CSI في قاعة المحكمة[***]

في إحدى حلقات هذا الموسم من مسلسل البرامج CSI، كانت الحلقة تضم فريقا تلفازيا يسجل نشاطات المحققين على مسرح جريمة غير حقيقية. وهنا يُرى كبير المحققين <G> كريسوم> وهو يزجُر الفريق بقوله «لم تفعلون هذا، وهناك عروض كثيرة جدا للطب العدلي يقدمها التلفاز[5]» هذا وإن كثيرا من المحامين والقضاة، الذين يعتقدون

نظرة إجمالية/ العلم مقابل الخيال[**]

- لاحظ المدّعون العامّون والقضاةُ وضباطُ الشرطة وجودَ ما يسمونه مفعول البرامج CSI، الناشئ عن برامج الطب العدلي (الشرعي) التلفازية، الذي يدفع المحلفين إلى طلبات غير معقولة بخصوص كمية الأدلة المادية وجودتها.
- لم يَثْبُتْ حتى الآن وجودُ مفعول البرامج CSI في قاعات المحاكم. لكن البرامج التلفازية أدت إلى زيادة الطلب على الأدلة المادية، مما أسهم في طرح قضايا تتعلق بنقص عدد العاملين وأمكنة تخزين الأدلة.
- مما لا شك فيه أن العروض التلفازية أسهمت أيضا في تعاظم اهتمام المعاهد العلمية بالأدلة التي يقدمها الطب العدلي، ويشهد على ذلك التزايد الهائل في عدد المتقدمين إلى دراسة هذا التخصص، منذ بدء عرض مسلسلات البرامج CSI على شاشات التلفاز.

(*) العنوان الأصلي: CSI REALITY

(**) Overview/ Science vs. Fiction

(***) The Effect in the Courtroom

(1) forensic: عدلي أو شرعي

(2) Dupin Adventures

(3) DNA analysis

(4) CSI: Crime Scene Investigation

(5) Forensic Files

(6) CSI effect: تأثر المحلفين بالتقنيات والإجراءات المبالغ فيها والتي تعرضها البرامج التلفازية وتستعين بالطب العدلي لكشف الجرائم. (التحرير)

بأن المحلّفين واقعون تحت تأثير مفعول البرامج CSI، موافقون على رأي كبير المحققين. لكنْ إلى أي مدى يؤثر مسلسل البرامج CSI والبرامج المرتبطة به في توقعات المحلّفين التي يأتون بها إلى المحاكمات؟

بدأت الصحافة تُولي هذا الموضوع اهتمامها عام 2003، وذلك بسردها حكايات ونوادر رواها محامون وقضاة عمّا يبدو أنه تغيُّرٌ في سلوك المحلّفين. وفي عام 2005، أخبر «J. ماركيز» [المدعي العام لولاية أوريگون ونائب رئيس الاتحاد الوطني للمدّعين العامين] قناة CBS News الفضائية أن «المحلفين يتوقعون منا الآن إجراء اختبار الدنا في كل قضية تقريبا. إنهم يتوقعون منا أن نكون مستوعبين لأكثر التقانات تقدما، وأن تكون هذه التقانات شبيهة بما يرونه في التلفاز.» وقد حدث ذلك فعلا، عندما شكا المحلفون في قضية جريمة قتل ارتُكبت في لوس أنجلوس، من أنه لم يُجْرَ على معطف ملوّث بالدماء اختبارُ الدنا، مع أنه لم يكن لمثل هذا الاختبار ضرورة، ذلك أن المتهم اعترف بأنه كان موجودا في مكان الجريمة. وقد صرّح القاضي أن التلفاز أسهم في تعريف المحلفين باختبارات الدنا، لكنه لم يعلّمهم متى يجب اللجوء إليها. وفي بحث أُجري في Delaware عن كيفية تعامل المحلفين مع الأدلة، ورد أن أحد المحلّفين في قضية دنا معقدة، شكا من أن هذا النوع من المشكلات التي واجهها في القضية لم يَرِدْ «في البرامج CSI.»

وقد انحى المحامون باللائمة على مفعول البرامج CSI، حين بُرِّئ محلّفون في بالتيمور رجلا من ارتكاب جريمة، على الرغم من وجود شاهدي عيان موثوقين في مكان وقوعها، وذلك بسبب نقص الأدلة المادية. وقد صرح «J. ليفين» [محامي الدفاع في ولاية نيوجيرسي] لإحدى الصحف المحلية بقوله: لقد رأيت تغيرا كبيرا يطرأ على المحلفين وعلى ما يتوقعونه في السنوات الخمس الأخيرة، إذ صاروا يطرحون أسئلة على القاضي خلال مداولات المحاكمة للاستفسار عمّا يرونه أدلة ناقصة. إنهم يريدون معرفة أين تقع بصمات الأصابع أو الدنا. فإذا لم تكن هذه الأشياء متوافرة، فهم يريدون معرفة سبب عدم توافرها. وفي محاولة القتل التي نُسبت إلى الممثل «R. بليك»، والتي جرت في كاليفورنيا، حاول المدعون العامون إقناع المحلفين بوجود دافع للجريمة لدى «بليك»، وبتوافر فرصة متاحة لارتكابها، واستدعوا شهودا أكّدوا أن «بليك» طلب إليهم قتل زوجته. لكنْ لم يُقدِّمْ أيّ دليل على وجود أي آثار للرصاصة أو الدماء، لذا أُخلي سبيل «بليك». وقد رُوِي عن أحد المحلفين قوله إنه لو كان المدعي العام - يملك جميع هذه المعلومات، لحكم على «بليك» بأنه مذنب.» وكانت هذه الهزيمة هي الأولى التي تعرّض لها المدعي العام من بين 50 قضية قتل.

وقبل أن تحظى البرامج CSI بشعبية واسعة، أصاب معظم المحامين قلق ناجم عن تشككهم في قدرة المحلّفين على فهم تعقيدات أدلة الدنا. ومع أن كثيرا منهم يُمضي حاليا وقتا طويلا في استيضاح الفرق بين الواقع وما يبثّه التلفاز، فقد أصبح من الممارسات العادية للمحامين أن يسألوا المحلّفين المستقبليين عن متابعتهم للبرامج التلفازية المتعلقة بمواضيع الطب العدلي. ثم إن بعض المدّعين العامّين يحاولون إبعاد أيّ آثار محتملة لمفعول البرامج CSI عن القضايا الجرمية. وفي المحاكمات التي تجري في ولايات أريزونا وإيلينوي وكاليفورنيا، وضعوا في قاعة المحكمة أشخاصا يُطلَق عليهم اسم شهود أدلة النفي[1] في مكان وقوف الشهود، بغية لفت انتباه المحلّفين إلى أن المحققين في الحياة الواقعية غالبا ما يخفقون في العثور على أدلة مادية مثل الدنا أو البصمات، في مسرح الجريمة.

بيد أن كثيرا من الخبراء القانونيين يحاجّون في أن مفعول البرامج CSI قد يكون خادعا. فقد ذكرت الصحيفة، التي أوردت تصريح محامي الدفاع «ليفين» في نيوجيرسي، أن قاضي المحكمة العليا «A. كاروفولو» قال: «ربما كان رد فعلي الأولي هو أن أقول نعم، ثمة وجود لمفعول البرامج CSI؛ لكنني أظن أن هذا ربما كان اشتباها أكثر من أي شيء آخر لديّ شعور بأن هذا المفعول يمكن أن يكون حقيقيا،

(1) negative evidence witnesses

مفعول البرامج CSI: غير مذنب بسبب التلفاز؟



أدت ندرة الأدلة المادية إلى تبرئة ساحة الممثل <R. بليك> [الذي يظهر في الصورة وهو يقبِّل محاميه بعد صدور قرار تبرئته] من جريمة قتل زوجته <B. L.باكلي> عام 2001. على الرغم من وجود الدافع لديه والفرصة المتاحة لارتكاب الجريمة. ويرى المحامي وهو يرفع عاليا بيده الجهاز ankle monitor وفي دعوى مدنية أقيمت في وقت لاحق، ثبت أن <بليك> كان مسؤولا قانونيا عن حادثة الموت الأليمة.

لكنني في واقع الأمر لا أتذكر أي موقف سمعت فيه هيئة المحلفين تقول بأنها كانت تتوقع المزيد.»

في عام 2005، كتب <S. كول> [من قسم علم الجريمة والقانون والمجتمع في جامعة كاليفورنيا] في مجلة وول ستريت جورنال: «ربما كان القول بأن للتلفاز أثرا في قاعات المحاكم ليس بالكلام المستحيل، لكنّ القول بأن مسلسل البرامج CSI والعروض المشابهة له تزيد من عدد قرارات التبرئة هو ادّعاء مذهل. وما تجدر ملاحظته، عند الحديث عن عروض الطب العدلي، هو أنه لا يُوجد قدر قليل من الأدلة المطلوبة لدعم التحقيقات فيها ثمة ميدان واسع من الأبحاث التي تدرس اتخاذ المحلفين لقراراتهم. لكنْ لا وجود لدراسة هدفها تحديد أهمية مفعول البرامج CSI فما هو متوافر يقتصر على أدلة من نوع الحكايات والنوادر.

ويبدو أن أول دراسة أجريت على مفعول البرامج CSI هي تلك التي نشرتها في الشهر 2006/2 <K. پودلاس> [المحامية والأستاذة المساعدة في قوانين وأخلاقيات وسائط الإعلام في جامعة نورث كاليفورنيا] وقد خلَصت <پودلاس> في دراستها إلى أن فرص التبرئة وأسبابها كانت نفسها في حالتي المحلَّفين المدمنين على مشاهدة عروض البرامج CSI، والمحلَّفين الذين لم يشاهدوها ـ أي إنها توصلت إلى غياب مفعول البرامج CSI. بيد أن ثمة كثيرا من المحلَّفين، الذين أُخضعوا للدراسة، قالوا بأن الافتقار إلى اختبارات الطب العدلي موضوعٌ يجب أن يُتَّخذ فيه قرار حاسم، مع أن الأدلة المادية قد لا تحل مشكلة التهم الافتراضية. هذا وقد أُجريت دراسات على محلَّفين حقيقيين، ويقوم حاليا خمسة من الطلبة الخريجين (ثلاثة في الولايات المتحدة، واثنان في إنكلترا) بإعداد أطروحاتهم عن مفعول البرامج CSI

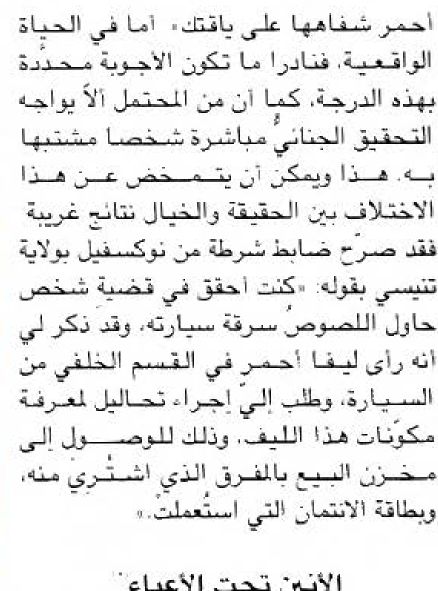
ما هو الحقيقي؟(*)

سواء أكانت عروضُ الطب العدلي تؤثر تأثيرا يمكن قياسه في طلبات المحلفين وقراراتهم أم لا، فما من شكّ في أن التلفاز يقدم للمشاهدين صورة مشوهة عن الطريقة التي ينفَّذ بها علم الطب العدلي، وعمّا يمكن، أو لا يمكن، أن ينجزه هذا العلم. فالممثلون الذين يؤدون في التلفاز، مثلا، أدوار طاقم التحقيقات في الجرائم، هم خليط مكوّن من ضابط في الشرطة ومحقق وعالم في الطب العدلي ـ وهذا التوصيف الوظيفي غير موجود في عالم الواقع. فكلٌّ من تنفيذ القوانين والتحقيق وعمل الطب العدلي معقد جدًا، إذ إن كلاً من هذه الأعمال يتطلب فرعا علميا وتدريبا وطرائق خاصة به. ثم إن التخصص في مختبرات الطب العدلي صار ضرورة ملحّة منذ أواخر الثمانينات. وكلّ عالم بالطب العدلي بحاجة إلى معرفة إمكانات الفروع العلمية الأخرى، لكنْ لا وجود لعالم يُعدّ خبيرا في كلٍّ من مجالات التحقيق في مسرح الجريمة

يضاف إلى ذلك أن المختبرات لا تُجري دائما جميع أنواع التحاليل بسبب تكلفتها أو قلة مواردها أو ندرة الطلبات عليها؛ ثم إن العروض التلفازية تسيء تقديم علماء الطب العدلي، إذ توحي بأن لديهم متسعا من الوقت لكل قضية؛ فغالبا ما يُولي عددٌ كبيرٌ من المحققين والتقنيين والعلماء اهتمامهم كلّه لإجراء تحقيق واحد. أمّا في واقع الحال، فإن العالم يكون مضطلعا بعدة قضايا موكولة إليه؛ ثم إن معظم مختبرات الطب العدلي تجد المسوّغات لاعتبار التحاليل المقدّمة إليها من المشكلات المعقّدة، لذا فإن القيام بها غالبا ما يكون مبررا لطلب ميزانيات أكبر لهذه المختبرات

وفي تصويرها للتقنيات العلمية، تختلف أيضا برامج الطب العدلي، المقدمة في العروض التلفازية، عما يجري في العالم الحقيقي. ويقدِّر <T. موريبلّو> [أستاذ الطب العدلي في جامعة ماريلاند] أن نحو 40 في المئة من التحقيقات التي تستعين بالطب العدلي، والتي تعرضها البرامج CSI، ليس لها وجود في الواقع. هذا وإن <C. هندرسون> [مديرة دار المقاصّة الوطنية للعلوم والتقانة والقانون في كلية الحقوق التابعة لجامعة ستيتسون] أخبرت إحدى محطات الإذاعة التابعة للجامعة بأن المحلّفين «يصابون أحيانا بخيبة الأمل إذا لم تُستعمَل بعضُ التقانات الجديدة التي يظنون أنها موجودة.» وبالمثل، فإن المحققين العاملين لا يمكنهم أن يبلغوا الدقة التي بلغها نظراؤهم على شاشة التلفاز. فباستطاعة ممثل في التلفاز تحليلُ عينة مجهولة باستعمال جهاز ذي شاشات مضيئة وأضواء متوهجة، والحصولُ على النتيجة: «أحمر شفاه من النوع ماكس فاكتور، رقم اللون 42، رقم الدُّفعة 439-A.» ويستطيع هذا الممثل نفسه أن يستجوب شاهدا ثم يقول: «نعرف أن الضحية كانت معك، لأننا اكتشفنا

(*) What Is Real?



أحمر شفاهها على ياقتك.» أما في الحياة الواقعية، فنادرا ما تكون الأجوبة محددة بهذه الدرجة، كما أن من المحتمل ألا يواجه التحقيق الجنائي مباشرة شخصا مشتبها به. هذا ويمكن أن يتمخض عن هذا الاختلاف بين الحقيقة والخيال نتائج غريبة. فقد صرّح ضابط شرطة من نوكسفيل بولاية تنيسي بقوله: «كنت أحقق في قضية شخص حاول اللصوص سرقة سيارته، وقد ذكر لي أنه رأى ليفا أحمر في القسم الخلفي من السيارة، وطلب إليّ إجراء تحاليل لمعرفة مكونات هذا الليف، وذلك للوصول إلى مخزن البيع بالمفرق الذي اشتُري منه، وبطاقة الائتمان التي استُعملت.»

الأنين تحت الأعباء(*)

على الرغم من عدم وجود جميع الأدوات التي تستعملها فرق البرامج CSI التلفازية، فلدى علماء الطب العدلي تقانات متقدمة تزداد مع الزمن تطورا وتعقيدا. لقد كانت تتطلب طرائقُ اختبار الدنا الأوّلية، التي استُعملت في أواخر الثمانينات، عينات بحجم ربع دولار أمريكي. أما الأساليب الحالية في التحليل فيكفيها عينة وزنها بضعة نانوغرامات(1) nanograms. ومن حين إلى آخر، نسمع في نشرات الأخبار عن حل لغز جريمة سُجّلت ضد مجهول أو عن استبعاد مشتبه فيه أو عن إلغاء حكم قضائي. وكل ذلك نتيجة استعمال تقانة متقدمة في علم الطب العدلي. وقد أضحت قواعد بيانات الدنا وبصمات الأصابع وذخائر الأسلحة النارية، مصادر مهمة تمكّن من الربط بين المجرمين والجرائم المتعددة التي ارتكبوها.

ومع ذلك، وبعيدا عن حرية عرض المعجزات التي نراها على شاشات التلفاز، يبذل كثير من المختبرات جهودا حثيثة في مجال تحاليل الطب العدلي استجابة للطلبات المتزايدة الموجهة إليها. وفيما يتزايد تقديرُ محققي الشرطة لفوائد علم الطب العدلي، ويتزايد أيضا تعرُّضهم لضغوط كي يقوموا بجمع قدر أكبر من الأدلة، فإنهم يقدّمون مزيدا من الموادّ المتعلقة بكثير من القضايا ليقوم الطبُّ العدليُّ بتحليلها. هذا ويقول المحققون في سلك الشرطة، الذين كانوا يجمعون في وقت من الأوقات خمسة من الأدلة من مسرح الجريمة، إنهم يجمعون الآن ما يراوح بين 50 و 400 دليل. وفي عام 1989، لم تعالج مختبراتُ الطب العدلي في فرجينيا سوى بضع دستات من القضايا. أما عدد القضايا، التي تنخرط فيها المختبرات هذا العام، فقد بلغ الآلاف. وبالطبع، ليس من الممكن ولا من الضروري، أخْذُ كل شيء من مسرح الجريمة للتحليل. ولكن الضغوط الاجتماعيّة والمهنيّة والسياسيّة، المستندة إلى احتمالات غير واقعية والتي تولدها البرامج التلفازية، تقتضي أنه إذا جلَب ضابط حقيبة مملوءة بأعقاب السجائر والأوراق التي تغلّفُ الوجبات السريعة ونفايات أخرى، فثمة احتمال كبير بتحويل معظم هذه المحتويات إلى مختبرات التحليل.

من سيحلل جميع هذه الأدلة؟



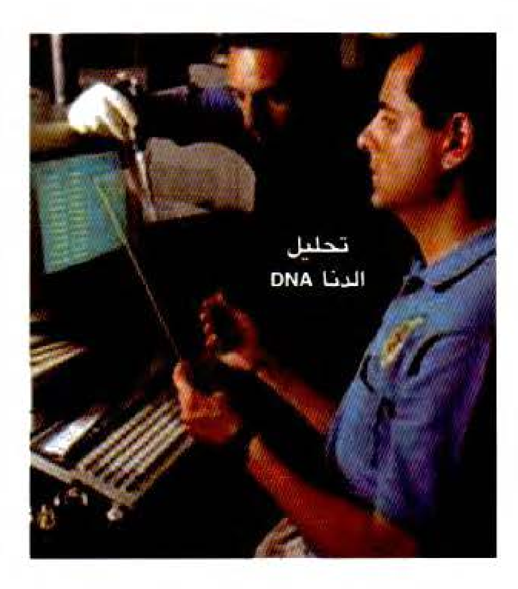
يفرض خزنُ ومتابعةُ ملايين الأدلة المادية تحديا حقيقيا يواجه المعنيين بتطبيق القوانين ومختبرات الطب العدلي.

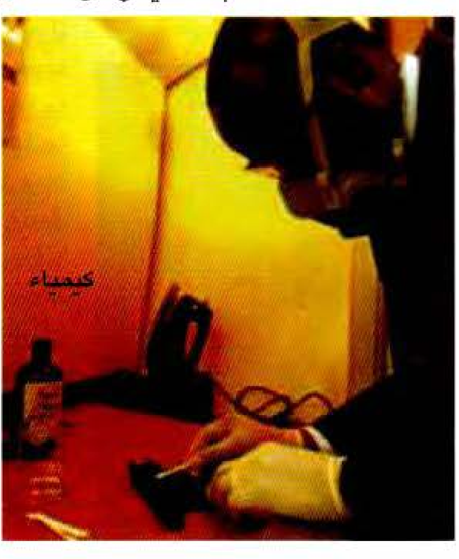
ثم إن هذا العمل كلّه يجب إنجازه، في كثير من الحالات، من قبل موظفين مثقلين بالأعباء الوظيفية. فعلى سبيل المثال، إن عدد سكان ولاية ماساتشوستس الموجودين خارج بوسطن، يقدّر بنحو 6.3 مليون نسمة، وعدد محللي الدنا في هذه المنطقة ثمانية (وفي بوسطن نفسها، يوجد ثلاثة محللين). أمّا في مدينة نيويورك، التي عدد سكانها 8 ملايين نسمة، فيوجد 80 محللا للدنا. بيد أنه يوجد في ماساتشوستس ومدينة نيويورك معدلان متقاربان من جرائم العنف (469.4 مقابل 483.3 لكل 100 000). وهذه الجرائم هي من النمط الذي يتطلب، إلى حد بعيد، استعمال أدلة الدنا. وهكذا يبدو أن عدد العاملين في برامج الطب العدلي في ماساتشوستس، مثلُها مثلُ كثير من الولايات الأخرى، قليل نسبيا. ولحسن الحظ، اكتشفت هذه الولايةُ عدم التوازن هذا، وفوّضت إلى أصحاب العلاقة توظيف مزيد من محللي الدنا في مختبرات الطب العدلي.

لقد ترتب على هذه النزعة الجديدة استفحال المشكلة المزعجة أصلا. وقد توصلت دراسة، نشرها حديثا مكتب الإحصائيات القضائية التابع لوزارة العدل في الولايات المتحدة، إلى أنه في أواخر عام 2002 (الذي أُتيحت فيه آخر البيانات)، جرى تحويل أكثر من نصف مليون قضية إلى مختبرات الطب العدلي، وأن نسبة ما نُفّذ من كامل الاختبارات المتعلقة بها يعادل 90 في المئة أو أكثر. وقد قدّرت الدراسةُ أنه بغية إنجاز طلبات التحاليل لذلك العام، لا بد من توظيف 1900 شخص إضافي يعملون كامل ساعات الدوام المعتادة. وفي دراسة أخرى أجرتها وزارة العدل، تبيّن أن أكبر 50 مختبرا للطب العدلي تسلّمت عام 2002 أكثر من 1.2 مليون طلب لإجراء تحاليل. وهذا

(*) Groaning under the Load

(1) نانوغرام = 10^{-9} غرام







يعني أن عدد القضايا التي قُدمت إلى هذه المرافق تضاعف خلال سنة واحدة. وقد حدثت هذه الزيادات مع أن معدلات الجريمة أخذت تتدنى منذ عام 1994.

وثمة أثر جانبي آخر للحجم المتصاعد للأدلة المادية، يتجلى في الحاجة إلى خزنها مددا مختلفة من الزمن. إذ إن هذه المدد مرتبطة بالقوانين المحليّة وقوانين الولاية والقوانين الفدرالية (الاتحادية). وتتضمن تحدياتُ خزن الأدلة وُجوبَ متابعة الأدلة من قبل الحواسيب والبرمجيات والعاملين؛ واقتناء التجهيزات المناسبة لإجراء تصنيف آمن للأدلة البيولوجية مثل الدنا؛ وتوافر مخازن مناسبة لحفظ الأدلة المادية. وفي كثير من التشريعات القضائية، يمكن بعد الاحتفاظ بالأدلة لفترة محددة من الزمن إتلافها أو إعادتها إلى مصدرها. هذا وإن عملية الخزن قد تكون موضوعا حساسا في القضايا القديمة أو الميّتة[1]. فقد توصّلتْ إحدى كليات الحقوق في مدينة نيويورك إلى أن الأدلة لن يكون لها وجود في 75 في المئة من التحقيقات التي يحتمل ألاّ تنتهي إلى إدانات.

إن مجرد متابعة الأدلة الموجودة فعلا يمكن أن يكون مسألة إشكالية. فقد أثار بحثٌ أجرته الجمعية الأمريكية لمديري مختبرات (مخابر) الجريمة، إلى أن أكثر من ربع عدد مختبرات الطب العدلي الأمريكية لا تقتني الحواسيب اللازمة لتعقب الأدلة. ويُقدِّر <M. ديل> [مدير معهد الطب العدلي في إحدى الجامعات، ومدير مختبر دائرة شرطة نيويورك سابقا] أنه في العقد القادم ثمة حاجة إلى أكثر من 10 000 عالم إضافي في الطب العدلي للتعامل مع هذه المواضيع المتنوعة. يضاف إلى ذلك أن تنفيذ تحديث مناسب لمرافق الطب العدلي سيكلّف 1.3 بليون دولار، وأن شراء آلات جديدة يتطلب توظيف مبلغ يتجاوز 285 مليون دولار.

الأثر في الحرم الجامعي[*]

لدى النظر إلى الجانب الإيجابي، نستطيع القول إنه تكوّن عند الناس، عن طريق عروض البرامج CSI والبرامج القريبة منها، انبهار بالعلم وإجلال له، بوصفه مهنة مثيرة ومهمة كانت غائبة عن الجماهير منذ برنامج أبولّو الفضائي. هذا وإن الانخراط في البرامج التعليمية للطب العدلي أخذ في الانتشار الواسع في طول الولايات المتحدة كلها. وعلى سبيل المثال، بدأ برنامج الطب العدلي في جامعة هونولولو بخمسة عشر طالبا، لكن هذا العدد بلغ مئة في أربع سنوات. وفي جامعة وست فرجينيا، التي أعمل فيها، تنامى برنامجُ علوم التحقيق الجنائي والطب العدلي كثيرا، بعد أن كان مقتصرا على أربعة خريجين فقط عام 2000، لكنه يشغل حاليا المرتبة الثالثة في الكبر بالحرم الجامعي، ذلك أنه يضم الآن أكثر من 500 طالب.

إن نمو البرامج الموجودة واستحداث برامج جديدة، أدّيا إلى إصدار المعهد الوطني للعدالة، بالتعاون مع جامعة وست فرجينيا، تقريرا خاصا عنوانه *التعليم والتدريب في علم الطب العدلي: دليل مختبرات علم الطب العدلي، والمعاهد التعليمية والطلبة*. وقد وفّر هذا التقرير القاعدةَ لهيئة منح الإجازات المتعلقة ببرامج الطب العدلي بإشراف الأكاديمية الأمريكية لعلوم الطب العدلي. وبدءا من الشهر 2006/1، حصل 11 برنامجا على إجازات مؤقتة أو شرطيّة أو كاملة.

ومن المحتمل أيضا أن تكون شعبية البرامج CSI قد أثرت في ديموغرافية علم الطب العدلي. ففي التسعينات، كان تمثيل النساء والأقليات ناقصا في الأدوار الرئيسية للمسلسلات التلفازية المتعلقة بالمواضيع العلميّة. لكن السجل الحديث للبرامج CSI بيّن أن هذا التمثيل تحسّن عموما. فالنساء موجودات الآن في معظم برامج الطب العدلي التعليمية بالولايات المتحدة، وكذلك في مهن الطب العدلي. هذا وإن ثلثي عدد العاملين في إدارة مختبرات الطبّ العدلي هم حاليا من الذكور، لكن هذا الرقم سيتناقص قطعا مع تقدم عدد العاملات من النساء.

ومع ذلك، فإن أفضلَ نتيجة للاهتمام الشعبي بالطب العدلي، هي زيادة الاستثمارات في الأبحاث التي تُجرى فيه. ففي الماضي، كان معظم هذه الأبحاث يُجرى في مختبرات الشرطة التي تعمل في مسائل محدّدة لها علاقة بالقضية الخاضعة للتحقيق. لكن التقدم الحقيقي لهذه التقانات يتطلب إجراء الاختبارات في مختبرات أكاديمية. فمثل هذه المختبرات يستطيع دراسة مسائل من الواضح أنها تحتاج إلى مزيد من البحث. وعلى سبيل

(*) The Effect on Campus
(1) old or cold cases

ـات التلفاز وكأنه يملك خبرات في مجالات متعددة من التخصصات.





«كاثرين ويلو» تؤدي دور محقق عدلي في البرامج التلفازية CSI.

المثال، تبيّن أن التحديات القانونية الحديثة تتطلب دراسة موضوع يتعلق بفرضية طال قبولُها، وهي الوحدانية المطلقة لبصمات الأصابع وعلامات الأختام وآثار العضّ وحزوز الرّصاصات والخطوط.

ومع تعاظم الاعتماد على علوم الطب العدلي، من الضروري أن تحظى هذه العلوم بدرجة أعلى من المصداقية. وقد أورد تقرير حديث، أعدّه المعهد الوطني للعدالة، أن الأبحاث الأساسية ضرورية للتحقق من صحة البصمات والدّمغات والأختام وأصالة الوثائق، ولفحص الأسلحة النارية. وقد أوصى التقرير أيضا بأن ترعى الحكومة الفدرالية أبحاثا لشرعنة[1] فروع علم الطب العدلي ومعالجة مبادئها الأساسيّة ومعدّل أخطائها ومعايير إجراءاتها. ومن الواضح أن تمويلا أكبر لمثل هذه الأبحاث سيكون إنجازا عميم الفائدة: فمن المثير للعجب أن تنفق الولاياتُ المتحدةُ 7 ملايين دولار فقط في السنة المالية 2006 على الأبحاث في الطب العدلي من خلال المعهد الوطني للعدالة (NIJ)، في حين يُنفق 123 مليون دولار على الطب البديل من خلال المعهد الوطني للصحة NIH.

إن أحد أهمّ التزامات حكومة ديمقراطية لمواطنيها، هو أن تكفل لهم السلامةَ العامةَ بطريقة عادلة. ويمثّل الطبّ العدلي جزءا مهما لا يتجزأ من عمليات إحقاق الحقّ في القضايا الجرمية. وفي القرن الحادي والعشرين، تُمثّل مختبرات الطبّ العدلي، المجهّزةُ جيدا، والتي يعمل فيها عدد كاف من التخصصيين، مرافق أساسيّة لتحقيق هذه الالتزامات. هذا وإن الاهتمام الشعبيّ بعلوم الطبّ العدلي يتزايد مع الوقت ومع التحديات التي تثيرها دقة هذه العلوم وقدراتها. وحتى لو لم يكن لما يُسمى مفعول البرامج CSI وجود في قاعة المحكمة، فإن المفعول الحقيقيّ هو إدراك الحاجة إلى تطوير مختبرات علوم الطب العدلي وأبحاثه. ■

(1) validate

المؤلف

Max M. Houk

مدير مشروع علوم الطب العدلي (الشرعي) التابع لجامعة وست فرجينيا. وكخبير في بيّنة الأثر وفي أنثروبولوجيا الطب العدلي، فقد عُهد إليه الإشراف على Trace Evidence Unit في مختبر مكتب التحقيقات الفدرالي بين عامي 1992 و 2001. حصل على البكالوريوس في الأنثروبولوجيا والماجستير في أنثروبولوجيا الطب العدلي من جامعة متشيگان الحكومية. وهو رئيس الهيئة المسماة Forensic Science Educational Program Accreditation Commission، وعضو في هيئتي تحرير «مجلة علوم الطب العدلي» (JFS) والمجلة Journal of Forensic Identification، وعضو في الأكاديمية الأمريكية لعلوم الطب العدلي، وعضو مشارك في الجمعية الأمريكية لمديري مختبرات الطب العدلي وفي الاتحاد الدولي لكشف الجرائم.

مراجع للاستزادة

The CSI Effect: Fake TV and Its Impact on Jurors in Criminal Cases. Karin H. Cather in *The Prosecutor*, Vol. 38, No. 2; March/April 2004.

Public Forensic Laboratory Budget Issues. Perry M. Koussiafes in *Forensic Science Communications*, Vol. 6, No. 3; July 2004. Available at **www.fbi.gov**

Trace Evidence Analysis: More Cases in Forensic Microscopy and Mute Witnesses. Max M. Houck. Elsevier/Academic Press, 2004.

Fundamentals of Forensic Science. Max M. Houck and Jay A. Siegel. Elsevier/Academic Press, 2006.

For updates on forensic science legislation, visit: **www.crimelabproject.com/**

Scientific American, July 2006

إنسالة (روبوت) في كل بيت(*)

يتنبأ قائد ثورة الحاسوب الشخصي بأن الحقل الساخن القادم سوف يكون الإنسالية(**).

<B. گيتس>

تخيَّل أنك تشهد الآن ولادة صناعة جديدة. إنها صناعة تقوم على تقانات حديثة ذات اكتشافات جديدة، حيث تبيع بضعة من الشركات العريقة تجهيزات شديدة التخصص للاستخدام في العمل، ويُنتج عدد متزايد من الشركات المبتدئة دمى خلاقة وأدوات للهواة ومنتجات خاصة مهمة أخرى. لكنها أيضا صناعة شديدة التبعثر، فليس فيها سوى بضعة مقاييس(2) ومنصات(3) عامة، ومشاريعها معقدة وتطورها بطيء، وتطبيقاتها العملية نادرة نسبيا. وفي الواقع، ومع كل ما فيها من إثارة وبشيرة، لا يستطيع أحد أن يقول بيقين متى، أو هل، سوف تصل هذه الصناعة إلى الكتلة الحرجة(4). لكنها إذا وصلت إليها، فإنها قد تغير العالم.

يمكن طبعا للفقرة السابقة أن تمثل وصفا لصناعة الحاسوب في منتصف سبعينات القرن العشرين، حينما أسَّستُ مع <P. ألن> الشركة مايكروسوفت. حينئذ، كانت الحواسيب الكبيرة الباهظة التكلفة تنفِّذ عمليات أقسام المحاسبة ومعالجة البيانات في الشركات الكبرى ووزارات الدولة والهيئات الأخرى. وكان الباحثون في الجامعات والمختبرات الصناعية المتقدمة يصنعون لبنات البناء الأساسية التي يمكن أن تجعل عصر المعلومات ممكن الوجود. حينها طرحت الشركة إنتل المعالج الميكروي 8080، وكانت الشركة آتاري تبيع اللعبة الإلكترونية الشهيرة Pong. وجهدت نوادي الحاسوب المحلية لتعرف تماما كيف يمكن لهذه التقانة الجديدة أن تكون مفيدة.

لكن ما هو في ذهني فعلا شيء آخر أشد ارتباطا بالحقبة الحالية، وهو بزوغ الصناعة الإنسالية التي تتطور بالطريقة نفسها التي تطورت بها صناعة الحاسوب قبل 30 عاما. فإنسالات التصنيع المستخدمة حاليا في خطوط إنتاج السيارات يمكن أن تُعتبر مكافئة لحواسيب الأمس الكبيرة. ومن المنتجات البارزة لهذه الصناعة أيضا أذرع إنسالية تقوم بالجراحة، وإنسالات استطلاع نُشرت في العراق وأفغانستان للتخلص من القنابل المزروعة في جوانب الطرق، وإنسالات منزلية لتنظيف أرض الغرف. وقد صنعت شركات الإلكترونيات دمى إنسالية يمكنها تقليد الناس أو الكلاب أو الديناصورات، وينتظر الهواة بفارغ الصبر وضع أيديهم على أحدث إصدار من نظام ليگو Lego الإنسالي.

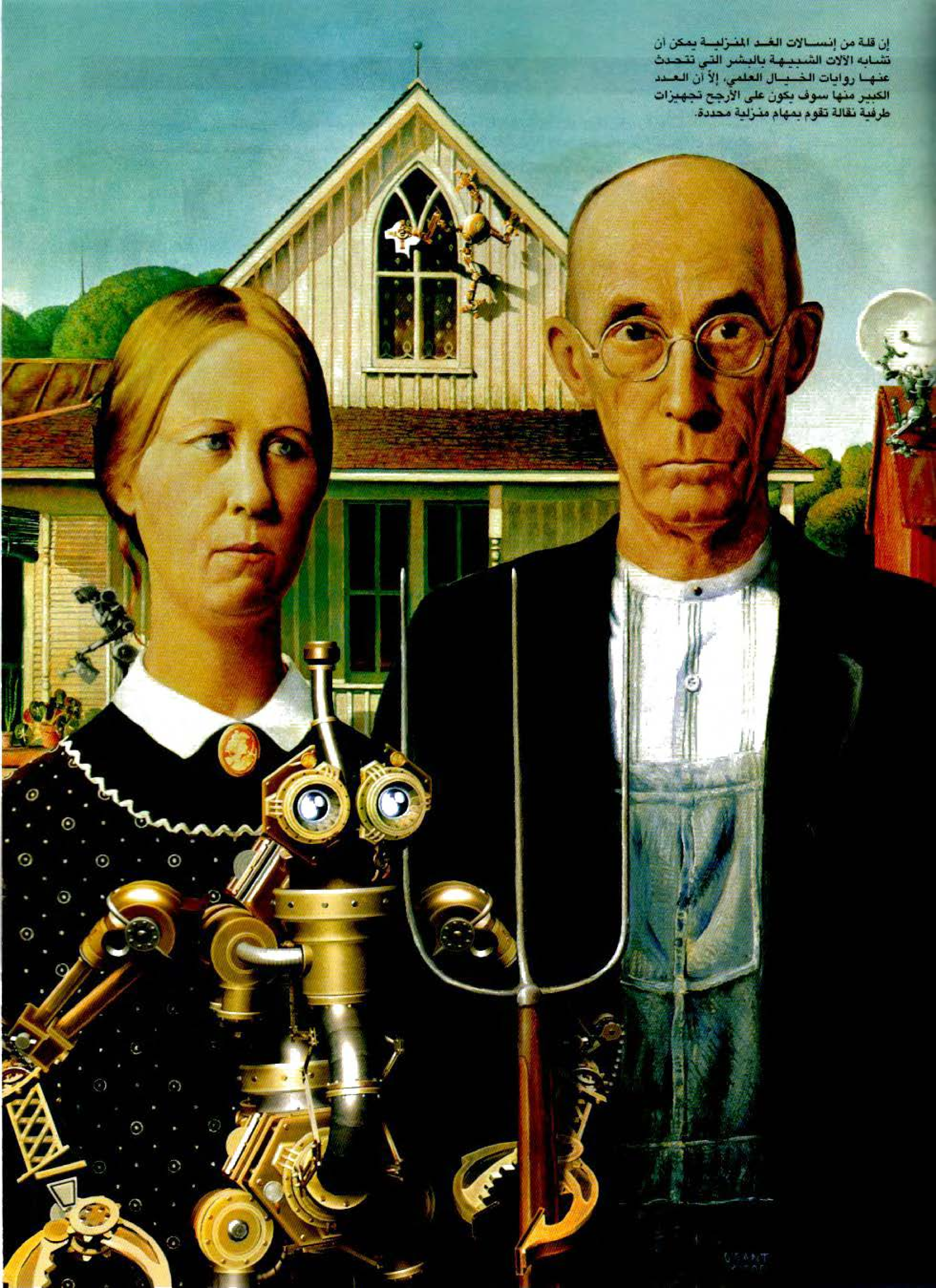
وفي الوقت نفسه، يحاول بعض أفضل الأدمغة في العالم حل أصعب المسائل في الإنسالية، كالإدراك البصري وتحديد المسار وتعلُّم الآلة. وهم يُحرزون نجاحا في هذا المضمار. ففي عام 2004، في التحدي الأكبر(5) الذي ترعاه وكالة مشاريع أبحاث الدفاع المتقدمة (DARPA)(6)، وهو مسابقة لصنع أول عربة إنسالية تستطيع تحديد طريقها ذاتيا على طريق طوله 142 ميلا في صحراء موجاڤ(7)، تمكَّن أفضل منافس من قطع مسافة 7.4 ميل فقط قبل أن يتعطل. أما في عام 2005، فقد قطعت خمس عربات المسافة كلها، وأنجزت العربة الرابحة ذلك بسرعة وسطية تساوي 19.1 ميل في الساعة. (في تشابه مدهش آخر بين صناعتي الحاسوب والإنسالية، موَّلت DARPA أيضا العمل لإقامة الشبكة Arpanet، وهي سلف precursor الإنترنت).

والأكثر من ذلك هو أن الصعوبات التي تواجه الصناعة الإنسالية اليوم تشابه تلك التي واجهتنا في صناعة الحاسوب قبل ثلاثة عقود. فليس لدى شركات الإنسالية برمجيات تشغيل مقيَّسة standard تتيح تشغيل برامج التطبيقات الشائعة في تجهيزات

نظرة إجمالية/ مستقبل الإنسالية(**)

- **تواجه الصناعة الإنسالية كثيرا من التحديات نفسها التي واجهتها صناعة الحاسوب الشخصي قبل 30 عاما. فبسبب الافتقار إلى مقاييس (معايير) ومنصات عامة، على المصممين عادة البدء من الصفر حين بناء آلاتهم.**
- **والمعضلة الأخرى هي تمكين الإنسالات من تحسُّس بيئتها والاستجابة إليها بسرعة. والانخفاض الأخير في تكاليف طاقة المعالجة والمحسَّات سوف يمكِّن الباحثين من التصدي لهذه المشكلات.**
- **يُمكن لبناة الإنسالات أيضا الاستفادة من الأدوات البرمجية الجديدة التي تسهِّل كتابة برامج تعمل في أنواع مختلفة من العتاديات. ويمكن لشبكات الإنسالات اللاسلكية أن تستمد طاقة حسابية من حواسيب شخصية لمعالجة مهام من قبيل الإدراك البصري وتحديد المسار.**

(*) A ROBOT IN EVERY HOME
(**) Overview/ The Robotic Future
(1) إنسالة robot نحت من إنسان-آلي، ومنها نشتق إنسالية robotics
(2) ج: مقيس standard أو معيار: عيار
(3) platform، وتعني في هذا المقام آلة حاسوبية
(4) critical mass الكتلة الحرجة وهي مقدار المادة المشعة اللازمة لحصول سلسلة التفاعلات النووية
(5) Grand Challenge
(6) Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
(7) Mojave Desert، صحراء تقع في جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية
(التحرير)



إن قلة من إنسالات الغد المنزلية يمكن أن تشابه الآلات الشبيهة بالبشر التي تتحدث عنها روايات الخيال العلمي، إلاّ أن العدد الكبير منها سوف يكون على الأرجح تجهيزات طرفية نقالة تقوم بمهام منزلية محددة.

يمكن للإنسالة والحاسوب الشخصي أن يكونا صديقين(*)



E ROBOT AND THE PC CAN BE FRIENDS (*)

متنوعة. وتقييس(1) المعالجات والعتاديات الإنسالية(2) الأخرى محدود أيضا، وقليل من برامج التكويد(3) المستخدمة في آلة معينة يمكن أن يُستخدم في آلة أخرى. وحينما يرغب أحد ببناء إنسالة جديدة، فإن عليه عادة البدء من المربع الأول.

وعلى الرغم من هذه الصعوبات، حينما أتحدث إلى الناس المنغمسين في الإنسالية - من الباحثين في الجامعات إلى التجار والهواة وطلبة المدارس - فإن مستوى الإثارة والتوقعات لديهم تذكّرني كثيرا بذلك الزمن عندما ترقّبتُ (المؤلف) و«P. آلن» تلاقي التقانات الجديدة معا وحلمنا باليوم الذي يصبح فيه الحاسوب على كل مكتب وفي كل بيت. وحينما أنظر إلى التوجهات التي بدأت اليوم بالتقارب، أستطيع رؤية مستقبل سوف تصبح فيه التجهيزات الإنسالية شائعة تقريبا في حياتنا اليومية. إنني أعتقد أن تقانات من قبيل الحوسبة الموزعة(5)، وتعرُّف الكلام والصورة، والاتصالات اللاسلكية العريضة المجال(4) سوف تفتح الباب أمام جيل جديد من التجهيزات الذاتية التحكم التي تمكّن الحواسيب من تنفيذ مهام في العالم المادي نيابة عنا. وقد نكون على عتبة حقبة جديدة سوف تنزل فيها الحواسيب الشخصية عن سطح المكتب لتمكّننا من رؤية وسمع ولمس وتداول أشياء في أمكنة لا نوجد فيها ماديا.

من الخيال العلمي إلى الواقع(*)

أشاع الكلمة "robot"، أي «إنسالة»، الكاتب المسرحي التشيكي Karel Capek، وذلك في عام 1921، إلا أن الناس تخيلوا صنع أدوات شبيهة بالإنسالات منذ آلاف السنين. ففي الأساطير اليونانية والرومانية، بنت آلهة فنون المعادن(6) خدما ميكانيكيين من الذهب. وفي القرن الميلادي الأول، صمّم «هيرون الإسكندراني» [وهو المهندس العظيم الذي نُسب إليه اختراع أول محرك بخاري] آلات مدهشة، منها ما قيل عنه إنه يمتلك المقدرة على الكلام. وتُعدّ لوحة «ليوناردو دافنشي» [التي رسمها في عام 1495 لفارس ميكانيكي يستطيع القيام وتحريك ذراعيه وساقيه] أول مخطط لإنسالة شبيهة بالإنسان.

وفي القرن الماضي، غدت الآلات الشبيهة بالإنسان شخصيات مألوفة في الأدب الشعبي من خلال كتب مثل *I, Robot* (*أنا، إنسالة*) لـ «I. أزيموف»، وأفلام من قبيل *Star Wars* (*حروب النجوم*)، ومسلسلات تلفازية من قبيل *Star Trek* (*الترحال بين النجوم*). وشيوع الإنسالات في القصص والروايات يشير إلى أن الناس أخذوا يتقبلون فكرة أن هذه الآلات سوف تمشي يوما

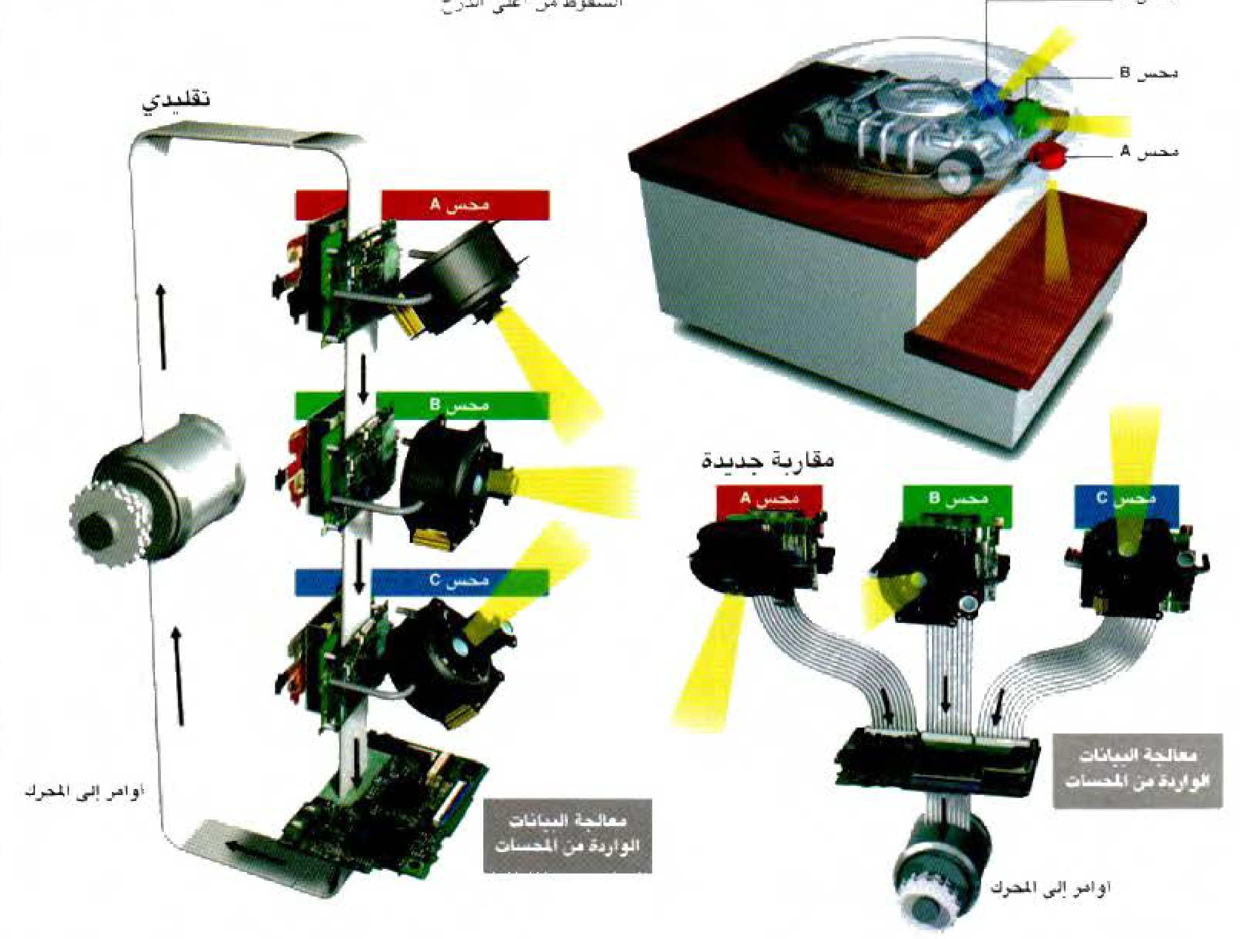
يمكن لربط الإنسالات المنزلية مع الحواسيب الشخصية أن يوفر كثيرا من الفوائد. فمثلا، يمكن للعامل في مكتب أن يسهر على أمن بيته وتنظيف أرضيته وريّ عسيله ورعاية المرضى الطريحي الفراش بمراقبة شبكة من الإنسالات المنزلية من خلال حاسوبه الشخصي. إن هذه الآلات يمكن أن تتواصل لاسلكيا معا، ومع حاسوب البيت الشخصي أيضا.

(*) From Science Fiction to Reality
(1) standardization
(2) robotics hardware
(3) programming code
(4) broadband
(5) distributed computing
(6) gods of metalwork

البرمجة الفضلى تعني كبوات أقل(*)

يمكن لمعالجة البيانات الواردة من محسات متعددة، من قبيل محسات الأشعة تحت الحمراء المبينة على الإنسالة عن اليمين مثلا، أن تواجه مأزقا. في النهج التقليدي (تحت)، يقرأ البرنامج أولا البيانات من جميع المحسات، ثم يعالجها ويرسل الأوامر إلى محركات الإنسالة قبل ابتداء الحلقة مرة أخرى. لكن إذا

كانت لدى المحس A (الأحمر) قراءات جديدة تشير إلى أن الآلة تقف على حافة أعلى الدرج، وكان البرنامج لا يزال يعالج بيانات المحس القديمة، فإن الإنسالة قد تسقط سقطة مريعة. والنهج الأفضل للتعامل مع معضلة التزامن هذه هو كتابة برنامج بمسارات بيانات منفصلة لكل محس (أسفل اليمين). وفي هذا التصميم، تُعالج القراءات الجديدة فورا لتمكين الإنسالة من ضغط الكوابح قبل السقوط من أعلى الدرج.



بيننا كمساعدين وحتى كمرافقين. لكنْ، مع أن الإنسالات تؤدي دورا أساسيا في صناعات من قبيل صناعة السيارات، حيث يوجد نحو إنسالة واحدة مقابل كل عشرة عمال، فإن الحقيقة هي أن أمامنا طريقا طويلا قبل أن تضاهي الإنسالات الفعلية نظيراتها في روايات الخيال العلمي.

إن أحد أسباب هذه الفجوة هو أن جعل الحواسيب والإنسالات تتحسس البيئة المحيطة بها وتستجيب لها بسرعة ودقة، هو أمر أشد صعوبة من المتوقع. فقد ثبت أن من الصعب جدا تزويد الإنسالات بقدرات يعتبرها البشر أمورا مسلَّما بها ـ كالقدرة على توجيه أنفسهم بالنسبة إلى الأشياء المحيطة بهم، والاستجابة للأصوات واستيعاب الكلام، وإدراك الأشياء المختلفة في أحجامها وتراكيبها ومتانتها. حتى إن شيئا بسيطا كالتمييز بين باب مفتوح ونافذة يمكن أن يكون مربكا جدا للإنسالات.

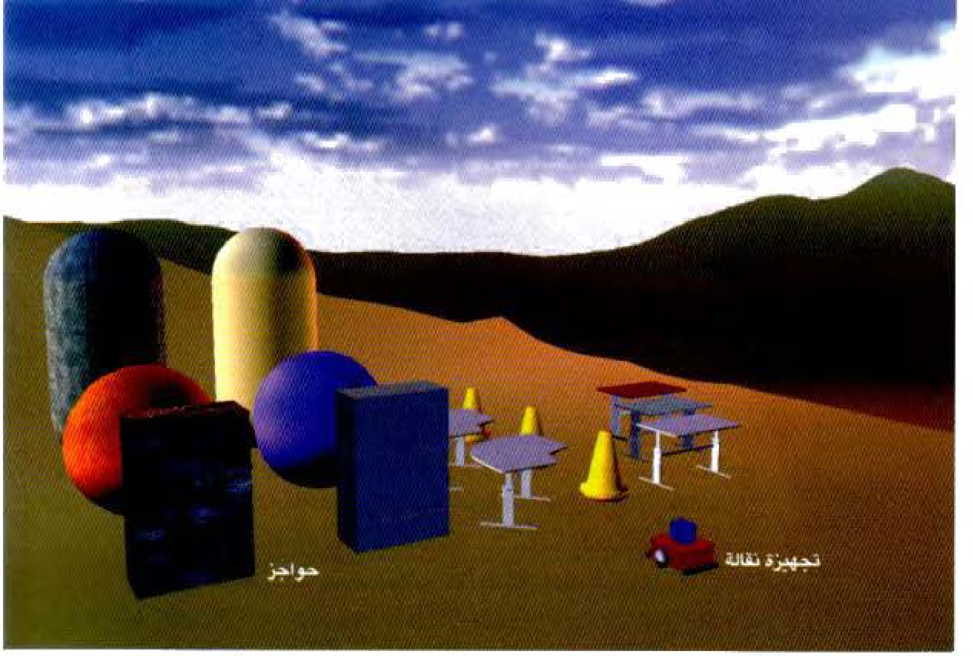
إلا أن الباحثين بدؤوا بإيجاد الحلول. وأحد الجوانب التي ساعدتهم على ذلك هو التوافر المتزايد لمقادير هائلة من الطاقة الحسابية. إن طاقة المعالجة بمقدار 1 ميگاهرتز، التي كانت تكلِّف 7000 دولار في عام 1970، يمكن أن تُشترى الآن بسنتات فقط. وشهد ثمن 1 ميگابتة من الذاكرة انخفاضا مشابها. لقد مكّن توافر الطاقة الحسابية الرخيصة العلماء من معالجة الكثير من المسائل الصعبة التي هي أساسية لجعل الإنسالات عملية. فاليوم، مثلا، تستطيع برامج تعرُّف الكلام تمييز الكلمات تمييزا جيدا، إلا أن المعضلة الكبرى هي بناء آلات تستطيع فهم مضمون تلك الكلمات. لكنْ مع استمرار الطاقة الحسابية بالازدياد، فإن مصمِّمي الإنسالات سوف يمتلكون طاقة المعالجة اللازمة للتصدي لمسائل ذات تعقيد أشد بكثير.

وثمة عائق آخر أمام تطوير الإنسالات هو التكلفة العالية للعتاديات، كالمحسات التي تمكِّن الإنسالة من تحديد بُعْد الشيء،

(*) BETTER PROGRAMMING MEANS FEWER TUMBLES

والمحركات والمخدِّمات الميكانيكية[1] التي تسمح للإنسالة، بتناول الشيء بقوة ورفق. لكن تلك التكلفة آخذة بالانخفاض بسرعة أيضا. فسعر قانس المسافة الليزري[2] الذي يُستخدم في الإنسالات لقياس المسافة قياسا دقيقا، كان 10 000 دولار قبل بضعة أعوام، أما اليوم فيمكن شراء القانس بنحو 2000 دولار. وثمة محسّات جديدة ذات دقة عالية تقوم على رادار عرض مجاله فائق[3]، متوافرة حتى بأسعار أقل.

ويمكن الآن لبُناة الإنسالات أن يزوِّدوها، مقابل تكلفة مقبولة، بشيپات النظام العام لتحديد الموقع GPS، وبكمرات ڤيديوية، وبصفيفة من المكروفونات (التي هي أفضل من المكروفونات العادية في تمييز الصوت من الضجيج المحيطي)، وبمجموعة من المحسّات الإضافية. إن تحسين القدرات الناتجة من ذلك، إضافة إلى طاقة الحساب وإمكانات التخزين المتزايدة، تسمح لإنسالات اليوم بفعل أشياء كتنظيف أرض الغرفة والمساعدة على تفكيك العبوات الناسفة، وهي أمور كانت مستحيلة بواسطة الآلات المنتَجة تجاريا قبل بضع سنوات.



تساعد السياقة الاختبارية الحاسوبية لتجهيزة نقالة، في بيئة افتراضية ثلاثية الأبعاد، بُناة الإنسالات على تحليل وضبط قدرات تصاميمهم قبل تجريبها. إن هذه الأداة، التي تمثل جزءا من مجموعة التطوير البرمجية «استديو مايكروسوفت الإنسالي»، تقوم بمحاكاة مفاعل قوى كالثقالة والاحتكاك.

نهج أساسي(*)

في الشهر 2004/2 زرت عددا من الجامعات المرموقة، منها جامعة كارنيگي ملّن ومعهد ماساشوستس للتقانة MIT وجامعة هارڤرد وجامعة كورنل وجامعة إلّنويس، للتكلم عن الدور القوي الذي يمكن للحواسيب أن تؤديه في حل بعض أكثر مشكلات المجتمع إلحاحا. وكان هدفي مساعدة الطلبة على فهم الإثارة والأهمية الكامنتين في علم الحاسوب، وتحفيز بعضهم لاتخاذ مهنة في هذا المجال. وفي كل جامعة، بعد تقديم كلمتي، كانت تتاح لي فرصة إلقاء نظرة شخصية على بعض أهم مشاريع البحث في أقسام علم الحاسوب. وبلا استثناء تقريبا، رأيت مشروعا واحدا على الأقل ينخرط في الإنسالية.

وفي الوقت نفسه، كان زملائي في مايكروسوفت يسمعون أيضا أناسا في الهيئات الأكاديمية وفي شركات الإنسالية التجارية يتساءلون إنْ كانت شركتنا تقوم بأي عمل في الإنسالية يمكن أن يساعدهم على أعمالهم التطويرية. لم نكن نعمل في الموضوع، ولذا قررنا النظر في الأمر عن كثب. وطلبت إلى <تاندي ترور> - وهو عضو في مجموعتي الاستراتيجية ويمتلك خبرة 25 عاما لدى مايكروسوفت - القيام بمهمة استطلاعية موسعة والتحدث إلى العاملين في الإنسالية. وكان ما وجده حماسا عاما لما تتضمنه الإنسالية من إمكانات، إضافة إلى رغبة شاملة لدى الصناعة في أدوات يمكن أن تسهِّل أعمال التطوير. لقد كتب <تاندي> في تقريره عن مهمته الاستطلاعية الذي قدمه إليّ: «يرى الكثيرون أن صناعة الإنسالية تشهد تحولا تقانيا أصبح فيه التوجه نحو البنيان الحاسوبي[4] أكثر قبولا». وتابع بقول: «وفق ما أشار إليه أخيرا <R. ويتكر> [قائد مجموعة كارنيگي ملّن في تحدي DARPA الأكبر] فإن معظم المكوِّنات العتادية متوفر، والمسألة الآن هي الحصول على البرمجيات الملائمة لها.»

في الأيام الأولى للحاسوب الشخصي، أدركنا أننا بحاجة إلى عنصر يمكن أن يجعل جميع الأعمال الطليعية تصل إلى الكتلة الحرجة لتندمج في صناعة حقيقية قادرة على إنتاج ما يُفيد فعلا على الصعيد التجاري. وتبين أن ما كنا نحتاج إليه هو لغة BASIC خاصة بمايكروسوفت. وحين ابتكرنا لغة البرمجة تلك في سبعينات القرن العشرين، وفرنا الأساس المشترك الذي مكّن من تشغيل البرامج المكتوبة لمجموعة من العتاديات في عتاديات أخرى. وجعلت اللغة BASIC أيضا برمجة الحاسوب أكثر سهولة، وهذا ما أدخل عددا أكبر من العاملين في هذه الصناعة. صحيحٌ أن كثيرين قد أسهموا إسهاما جوهريا في تطوير الحاسوب الشخصي، إلا أن لغة BASIC الخاصة بمايكروسوفت كانت أحد المسرِّعات الأساسية للإبداعات البرمجية والعتادية التي جعلت ثورة الحاسوب الشخصي ممكنة.

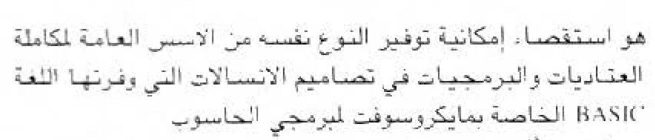
بعد قراءة تقرير <تاندي>، تبيَّن لي أنه قبل أن تحصل في صناعة الإنسالية القفزة الكمومية[5] نفسها التي حصلت في صناعة الحاسوب الشخصي قبل ثلاثين عاما، فإن على تلك الصناعة أيضا أن تبحث عن ذلك العنصر المفقود. لذا طلبت إليه تشكيل فريق صغير ليشترك مع العاملين في حقل الإنسالية لتطوير مجموعة من أدوات البرمجة التي يمكن أن توفر شبكة النقل الأساسية التي تمكِّن أي شخص يهتم بالإنسالات، حتى وإن كان لا يعرف عن برمجة الحاسوب إلا مبادئها الأولية، أن يكتب بسهولة تطبيقات إنسالية يمكن أن تعمل في أنواع مختلفة من العتاديات. وكان هدفي من ذلك

(*) A Basic Approach

(1) servo، وهو أداة تحريك مكوِّنات الآلة.

(2) radar range finders (3) ultrawideband radar (4) architecture

(5) quantum leap تُعبر عن التقدم الكبير المفاجئ، والقفزة الكمومية في الإلكترون هي انتقاله من مستوى طاقة إلى آخر قفزا لا تدرُّجا. (التحرير)



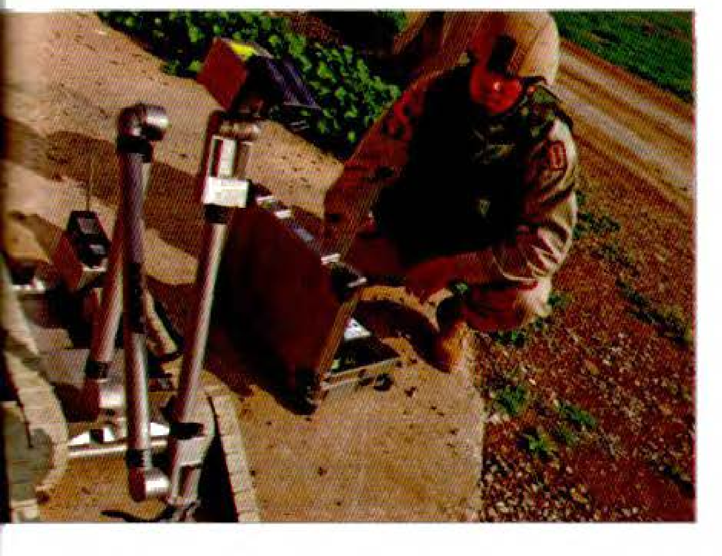
هو استقصاء إمكانية توفير النوع نفسه من الأسس العامة لمكاملة العتاديات والبرمجيات في تصاميم الإنسالات التي وفرتها اللغة BASIC الخاصة بمايكروسوفت لمبرمجي الحاسوب.

لقد تمكّنت مجموعة تاندي الإنسالية من استخدام عدد من التقانات المتقدمة التي طورها فريق يعمل بقيادة «كريك موندي» [كبير موظفي البحث والاستراتيجية لدى مايكروسوفت]. إن إحدى تلك التقانات سوف تساعد على حل واحدة من أصعب المسائل التي تواجه مصممي الإنسالات، وهي كيفية التعامل في الوقت نفسه مع جميع البيانات الواردة من محسَّات عدة، وإرسال الأوامر المناسبة إلى محركات الإنسالة. تُعرف تلك المعضلة بالتزامن(1). في مقاربة مألوفة، يُكتب عادة برنامج تقليدي وحيد الخيط(2)، أي إنه برنامج يتألف من حلقة طويلة تقوم أولا بقراءة البيانات من جميع المحسَّات ثم تعالجها وتعطي الأوامر التي تحدد سلوك الإنسالة، وذلك قبل ابتداء الحلقة مرة أخرى. إن عيوب هذا النهج واضحة: إذا كانت لدى إنسالتك بيانات جديدة تقول إنها موجودة على حافة منحدر شديد، لكن البرنامج مازال في أسفل الحلقة يحسب المسار ويعطي الأوامر إلى الدواليب للدوران اعتمادا على بيانات محس سابقة، فإن ثمة احتمالا كبيرا لسقوط الإنسالة قبل أن تتمكن من معالجة البيانات الجديدة.

لا تقتصر معضلة التزامن على الإنسالية وحدها، فاليوم، ومع ظهور المزيد من التطبيقات المكتوبة للشبكات الموزعة للحواسيب، يجهد المبرمجون لمعرفة كيفية التنسيق الفعال بين أجزاء برنامج يعمل في مخدِّمات مختلفة في وقت واحد. ومع استبدال الحواسيب الوحيدة المعالج لتحل محلها آلات ذات معالجات متعددة، ومعالجات متعددة النوى(3) - أي دارات متكاملة تحتوي معالجين أو أكثر يعملان معا لتحقيق سرعة أداء أعلى، سوف يحتاج مصممو البرمجيات إلى طريقة جديدة لبرمجة التطبيقات ونظم التشغيل ولاستغلال طاقة المعالجات العاملة بالتوازي استغلالا تاما. يجب أن تتعامل البرمجيات الجديدة مع مشكلة التزامن.

إن إحدى المقاربات لمعالجة التزامن هي كتابة برامج متعددة الخيوط(4) تسمح للبيانات بالسير في مسارات كثيرة. لكن هذه المهمة هي إحدى أصعب المهام في البرمجة، وهذا ما يمكن أن يخبرك به أي مطور كتب برامج متعددة الخيوط. أما الحل الذي ابتكره فريق كريك لمشكلة التزامن فهو شيء يُسمى التزامن والتنسيق أثناء التنفيذ (CCR)(5)، وهو مكتبة إجرائيات، أي مكتبة برامج ذات مهام محددة تجعل من السهل كتابة تطبيقات متعددة الخيوط تستطيع التنسيق بين عدد من الأنشطة المتزامنة. وقد تبين أن مكتبة البرامج CCR، التي صُمِّمت لمساعدة المبرمجين على الاستفادة من طاقة النظم المتعددة النوى والمتعددة المعالجات، ملائمة للإنسالية أيضا. فباستخدام هذه المكتبة لكتابة البرامج الإنسالية، يستطيع مصمم الإنسالات تحقيق تقليص هائل في احتمال اصطدام إنسالة بحائط نتيجة انشغال برمجياته بإرسال أوامر إلى دواليبه بدلا من قراءة بيانات من محسَّاته.

إضافة إلى معالجة مشكلة التزامن، فإن العمل الذي قام به فريق «كريك» سوف يبسِّط أيضا تطبيقات الإنسالية الموزعة(6) من خلال تقانة تسمى خدمات البرمجيات اللامركزية (DSS)(7). تمكِّن الخدمات DSS المطورين من كتابة تطبيقات تعمل فيها الخدمات، أي أجزاء البرنامج التي تقرأ بيانات المحسات أو تتحكم في المحركات مثلا، باعتبارها سيرورات منفصلة يمكن التنسيق بينها بالطريقة نفسها تقريبا التي



تُجمَع بها النصوص والصور والمعلومات من مخدِّمات مختلفة في صفحة ويب Web. ونظرا إلى أن البرامج DSS تسمح للمكونات البرمجية بالعمل معزولة بعضا عن بعض، فإنه يمكن إيقاف مكون من مكونات الإنسالة، حين إخفاقها، وإعادة تشغيلها، أو حتى استبدالها، من دون الحاجة إلى إعادة إقلاع الآلة. إن هذا البنيان(8)، مع تقانة الاتصال اللاسلكي العريض المجال، يجعلان من السهل مراقبة الإنسالة وضبطها من موقع بعيد باستخدام **متصفح ويب** Web browser.

وأكثر من ذلك هو أنه ليس من الضروري وضع التطبيق القائم على الخدمات DSS، والذي يتحكم في آلة إنسالية، بكامله في الإنسالة نفسها، بل يمكن أن يكون موزعا على أكثر من واحد من الحواسيب. ونتيجة لذلك، يمكن للإنسالة أن تكون آلة رخيصة نسبيا تعْهد بمهام المعالجة المعقدة إلى عتاديات تعمل بسرعة كبيرة موجودة في حواسيب اليوم الشخصية المنزلية. وأعتقد أن هذا التطور سوف يمهد السبيل أمام فئة جديدة كليا من الإنسالات التي هي أساسا تجهيزات طرفية لاسلكية نقالة(9) تستمد طاقتها الحسابية من حاسوب شخصي للتعامل مع مهام كثيفة المعالجة من قبيل الإدراك البصري وتحديد المسار. ونظرا إلى أنه يمكن ربط هذه التجهيزات معا باستخدام شبكة، فإنه يمكن أن نتوقع ظهور مجموعة من الإنسالات التي تستطيع العمل متناغمة لتحقيق أهداف من قبيل وضع خريطة لقاع البحر أو زراعة النباتات.

تُعدُّ هذه التقانات جزءا أساسيا من أستوديو مايكروسوفت الإنسالي(10)، وهو مجموعة تطوير برمجية بناها فريق «تاندي». يتضمن هذا الأستوديو الإنسالي أيضا أدوات تسهِّل بناء تطبيقات إنسالية باستخدام تنوع كبير من لغات البرمجة. ومن أمثلتها أداة محاكاة(11) تتيح لبُناة الإنسالات اختبار تطبيقاتهم في بيئة افتراضية ثلاثية الأبعاد، وذلك قبل تجريبها في عالم الواقع. إن هدفنا من هذا الإصدار هو إيجاد منصة مفتوحة تكلفتها مقبولة وتتيح بسهولة لمطوري الإنسالات مكاملة العتاديات والبرمجيات في تصاميمهم.

(1) concurrency
(2) single thread أو وحيد النَّيسب، أو وحيد التشعب
(3) multicore
(4) multi threaded، و متعددة النياسب، و متعددة التشعب
(5) concurrency and coordination runtime
(6) distributed robotic
(7) decentralized software services
(8) أو الهيكلة
(9) wireless peripheral devices
(10) Microsoft Robotics Studio
(11) simulating tool



ولادة صناعة: قدم مصنعو الإنسالات حتى الآن أنواعا مختلفة من الآلات المفيدة. لكن تصاميم تلك الآلات متباينة جدا. فستانلي Stanley (في الأعلى)، وهو سيارة ذاتية التحكم بناها فريق سباق ستانفورد، ربح تحدي DARPA الأكبر في عام 2005، حيث قطع أكثر من 130 ميلا في الصحراء دون مساعدة من سائق بشري. و iRobot، وهي شركة متمركزة في برلينكتون بماساتشوستس، تصنع Packbot EOD (الصفحة المقابلة) الذي يساعد على التخلص من القنابل في العراق. وتصنع Roomba (اليمين) الذي ينظف الأرضيات الخشبية والسجاد. و Lego Mindstorms (أقصى يمين هذه الصفحة)، وهي مجموعة أدوات لبناء الإنسالات وبرمجتها، عدت أكثر المنتجات بيعا في تاريخ شركة صناعة الدمى الدنماركية Lego Group

هل علينا أن نسميها إنسالات؟[*]

هل ستصبح الإنسالات، قريبا، جزءا من حياتنا اليومية؟ وفقا للاتحاد الدولي للانسالية[1]، كان في عام 2004 نحو مليوني إنسالة شخصية قيد الاستخدام في العالم، وسوف يجري بناء سبعة ملايين أخرى بحلول عام 2008. وتأمل وزارة المعلومات والاتصالات في كوريا الجنوبية بوضع إنسالة في كل بيت فيها بحلول عام 2013. وتتنبأ رابطة الإنسالات اليابانية بأن الاستثمارات العالمية في صناعة الإنسالات الشخصية سوف تبلغ، بحلول عام 2025، نحو 50 بليون دولار في السنة، في حين أنها تساوي نحو خمسة بلايين دولار حاليا.

وعلى غرار صناعة الحاسوب الشخصي في سبعينات القرن العشرين، فإن من المستحيل التنبؤ تماما بالتطبيقات التي سوف تحرك هذه الصناعة الجديدة. إلاّ أنه يبدو من المرجح أن الإنسالات سوف تؤدي دورا مهما في توفير المساعدة لكبار السن، وحتى مرافقتهم. وقد تساعد التجهيزات الانسالية الناس المعاقين على التحول وتزيد من قوة وتحمُّل الجنود وعمال البناء والعاملين في المجال الطبي. وسوف تقوم الانسالات بصيانة الآلات الصناعية الخطيرة، وتداول المواد السامة والمتفجرة، ومراقبة أنابيب النفط البعيدة. وسوف تمكّن العاملين في الرعاية الصحية من تشخيص الامراض ومعالجة المرضى الذين قد يبعدون آلاف الأميال، وسوف تكون عناصر أساسية في المنظومات الأمنية وعمليات البحث والإنقاذ.

صحيحٌ أن بضعة من إنسالات الغد قد تشابه الآلات الشبيهة بالبشر التي ظهرت في فلم حرب النجوم، إلا أن معظمها لن يكون كالشبيه البشري (C-3PO)[2]. وفي الواقع، مع ازدياد شيوع التجهيزات الطرفية النقالة، قد تكون ثمة صعوبة متزايدة في تحديد تام لماهية الإنسالة. فنظرا إلى أن هذه الآلات الجديدة سوف تكون شديدة التخصص وواسعة الانتشار، وإلى أنها لن تبدو إلا قليلا شبيهة لآلات روايات الخيال العلمي الذاتية الحركة ذات الساقين، فإننا على الأرجح لن نسميها إنسالات. ومن ناحية أخرى، مع تطور هذه التجهيزات لتصبح تكاليفها مقبولة للمستهلك، فإنها يمكن أن تكون ذات أثر عميق في طرائق عملنا وتواصلنا وتعلُّمنا وتسلية أنفسنا، كذاك الذي كان للحاسوب الشخصي خلال الثلاثين سنة السابقة. ■

(*) Should We Call Them Robots?
(1) International Federation of Robotics
(2) الانسالة الخيالية المطلية بالذهب التي ظهرت في فيلم حرب النجوم (التحرير)

المؤلف

BILL GATES

أحد مؤسسي ورئيس الشركة مايكروسوفت، وهي كبرى شركة للبرمجيات. حينما كان في جامعة هارفرد في سبعينات القرن العشرين، طوّر إصدارا من لغة البرمجة بيسك BASIC لأول حاسوب صغير، وهو الحاسوب MITS Altair. وترك الجامعة في السنة قبل الأخيرة ليكرّس طاقاته لمايكروسوفت، الشركة التي أنشأها في عام 1975 مع رفيق طفولته Paul Allen. وفي عام 2000، أسّس مع زوجته ميليندا مؤسسة بيل وميليندا كيتس Bill & Melinda Gates Foundation التي تهتم بتحسين الصحة وتقليص الفقر وزيادة إمكانات الحصول على التقانة المعلوماتية في شتى أنحاء العالم.

مراجع للاستزادة

More information about robotics in general is available at:
Center for Innovative Robotics: **www.cir.ri.cmu.edu**
DARPA Grand Challenge: **www.darpa.mil/grandchallenge/**
International Federation of Robotics: **www.ifr.org**
The Robotics Alliance Project: **www.robotics.nasa.gov**
Robotics Industries Association: **www.roboticsonline.com**
The Robotics Institute: **www.ri.cmu.edu**
The Tech Museum: Robotics: **www.thetech.org/robotics/**
Technical details and other information about Microsoft Robotics Studio can be found at **msdn.microsoft.com/robotics**

Scientific American, January 2007

التجوال في الغابات(*)

السواتل(1) تدلّ على الطريق في رياضة كشف المخبأ(2) الجديدة.







مُستقبلات منظومة تحديد الموقع العالمية **Global Positioning System (GPS)** هي أجهزة ملاحية محمولة سهلة الاستعمال. يستطيع الجهاز **eTrex Legend** من الشركة **Garmin International** (*في اليسار*) والجهاز **Sportrek Color** من الشركة **Magellan** (*في الوسط*) رسم طريق رحلتك وتبيان المطاعم والفنادق والأمكنة المُشوِّقة(4) الموجودة على طول الطريق.

تهانيَّ! فقد عثرتَ عليه! بقصد أم من غير قصد! لمَ هذا الوعاء مخبأ هناك؟ ما هذه الأشياء المتراكمة هنا بحق السماء؟

فيما كنت واقفا على تلة بمحاذاة بحيرة جورج في نيويورك، رحت أتفحّص الرسالة المتروكة في وعاء پلاستيكي كنت قد عثرت عليه منذ لحظات ملقى على حرف صخري ناتئ. كانت الرسالة تشرح بعض القواعد المزعجة التي تستند إليها لعبة رياضية جديدة عالية التقنية تدعى رياضة كشف المخبأ. قرأت الرسالة بانفعال.

«هذا الوعاء هو جزء من لعبة عالمية مكرّسة لمستخدمي ***منظومة تحديد الموقع العالمية***(3) *Global Positioning System (GPS) تتضمن هذه اللعبة أساسا «كنزا» مُخبأ ـ هو هذا الوعاء ومحتوياته، يخفيه أحد مستخدمي المنظومة GPS، وينشر إحداثياته الصحيحة ليتمكّن مستخدم آخر لهذه المنظومة، من متصيّدي الكنوز، العثور عليه. لعبة كشف المخبأ هي بدعة جديدة نسبيا، وقواعدها بسيطة للغاية:*

1. *خذ شيئا من المخبأ.*
2. *اترك شيئا في المخبأ.*
3. *اكتب ملحوظة في سجل التدوين.*

قبل تجربتي مع لعبة كشف المخبأ، كنت أعتقد أن استعمال وحدات محمولة من المنظومة GPS يقتصر على الجوّالة في البراري وعلى العسكريين. غير أن اقتناء العامة لهذه الوحدات والأجهزة صار في السنوات الأخيرة أكثر يسرا. تتألف المنظومة GPS من 24 ساتلا وخمس محطات أرضية فعند مدارات يبلغ ارتفاعها نحو 12 000 ميل من فوق سطح الأرض. ترسل السواتل إشارات راديوية ضعيفة القدرة على ترددات ضمن نطاق الترددات فوق العالية (UHF) وبقياس زمن انتشار الإشارات القادمة من أربعة سواتل على الأقل، يستطيع جهاز محمول مُستقبل (نظريا على الأقل) تحديد موضعه عن طريق **التثليث** triangulation أينما كان على سطح الكوكب.

وإلى عهد قريب كانت الإدارة الأمريكية تقوم **ببعثرة** scramble إشارات المنظومة GPS، حتى لا يتمكن إلا العسكريون من استقبال أكثر القراءات دقة. ولكن إدارة «كلينتون» أوقفت في الشهر 5/2000 بعثرة الإشارات متيحة بذلك لوحدات المنظومة GPS المدنية تحديد مواقعها بنسبة خطأ تراوح ما بين 20 و 40 قدما. وبعد ذلك بقليل، طرحت عدة شركات أجهزة استقبال رخيصة الثمن وسهلة التشغيل، وتشتمل على خرائط وشاشات مدمجة تعمل على غرار صفحة في شبكة الوب Web. وفي الوقت نفسه تقريبا، نفذت إدارة الطيران الفدرالية منظومة تعزيز الملاحة الدولية (WAAS)(5)، وهي شبكة من المحطات الأرضية تعمل على تحسين دقة المنظومة GPS، عن طريق تصحيح أخطاء قياس الزمن والتغيرات في مدارات السواتل. وتستطيع الأجهزة المزودة بأفضلية المنظومة WAAS أن تحدد موضع المُستخدم بدقة تصل إلى تسع أقدام، شرط أن يكون الجهاز واقعا في خط البصر المباشر إلى السماء وألا يكون الجو غائما.

كنت مولعا منذ صباي في الفرقة الكشفية بالاستدلال على الدروب في الغابات، لذلك كانت سعادتي غامرة عندما أوحى صديق لي بفكرة لعبة كشف المخبأ. وفي أول محاولة لنا، اعتمدنا على الجهاز المحمول GPS III+، الذي تصنعه الشركة Garmin international، ومسترشدين بقراءات الجهاز، سلكنا ممرا صاعدا في هضبة وقفزنا فوق مجار مائية وسرنا في مرج أخضر تصل سوقه إلى صدورنا ونزلنا إلى وهْد تنتشر فيه الأحجار. ونصيحتي إلى كل عاقل: لا تنظر أبدا إلى الأسفل نحو شاشة جهازك أثناء التجوال في الغابة. فقد دفعت

(*) A WALK IN THE WOODS
(1) satellite قمر صنعي
(2) geocatching
(3) أو منظومة التموضع العالمية
(4) attracions
(5) Wide Area Augmentation System

(التحرير)

ثمن قلة انتباهي. ضربة قوية تلقيتها على رأسي من غصن متدل منخفض.

وبعد مسيرة شاقة مسافة 1.2 ميل، أقرأنا الجهاز أننا بلغنا الإحداثيتين الطولانية والعرضانية للخبيئة (ويسميان «إحداثيتا» المعْلم[1] في لغة المنظومة GPS). وبسبب الغطاء الكثيف من الأشجار فقد كان خطأ موضعنا يقارب 45 قدما. فاضطررنا إلى البحث في كل صخرة وشجرة وجَوبة في المنطقة مدة 20 دقيقة من دون أن نعثر على شيء؛ ثم ما لبثت أن انطلقت فجأة صيحة الفوز من «D. تايلور» [مرشدي في هذه اللعبة] وهو يشير بيده إلى جرف صخري. فقد كانت جائزتنا مخبأة تحت كومة من العيدان: وعاء بلاستيكي بعداد 4 بوصات (إنشات) و12 بوصة، كُتب على غطائه باللون الأسود "geocaching.com".

رفعنا الوعاء بكل عناية وفتحنا الغطاء، فوجدنا داخله حفنة من الأشياء البسيطة والطريفة: صافرة ومُصوِّرة (كاميرا) لاستعمال واحد[2] ومحْمَليّ مفاتيح ومصباح يدوي منمنم وشص سنارة، وما إلى ذلك ـ ومعها سجل تدوين وقلم. وبعد أن قرأت جميع الملاحظات التي سجلها اللاعبون الآخرون، وقّعت اسمي في السجل وأخذت شص السنارة من الوعاء، وبعملي هذا أكون قد انخرطت في اللعبة. أودعنا تذكارنا في الوعاء ـ عبارة عن دماغ من المطاط يحمل كلمة «ساينتفيك امريكان». والتقطنا صورة تذكارية لنا، مستخدمين المصوِّرة الوحيدة الاستعمال. ثم أعدنا الوعاء، وخبأناه في مكانه، وغطيناه بالأغصان والعيدان. نزلنا الجبل فرحين بالنصر الذي حققناه، يقودنا الجهاز إلى إحداثيات سبق أن أدخلناها لموقع سيارتنا.

وفي جولاتي اللاحقة، اختبرت أربعة أجهزة مختلفة من وحدات المنظومة GPS، من حيث دقتها وسهولة استعمالها. اخترت وحدتين من وحدات المبتدئين هما: Geko 201 من الشركة Garmin International (ثمنها 149 دولارا) و SporTark Map من الشركة Magellan (ثمنها 229 دولارا)، مع وحدتين أكثر تقدما هما: eTrex Venture من الشركة Garmin's (ثمنها 194 دولارا) و SporTark Color من الشركة Magellan's (ثمنها 499 دولارا). وتعرض كل واحدة من هذه الوحدات خريطة على شاشة مع مُوصِلة رقمية ومتقفّي سواتل. يتيح لك معرفة عدد إشارات المنظومة GPS التي تستقبلها. وإدخال إحداثيات المعلم التي تدل على المكان الذي تقصده أمر سهل، بسهولة كتابة نص الرسالة على هاتف خلوي. وكل ما تحتاج إليه، لكي تحصل على معلومات عن أحد المواقع من سواتل المنظومة GPS، هو أن توجِّه الوحدة نحو السماء. ومع الخبرة، يصبح تفسير الخرائط وفهم قراءات الموصلة أسهل فأسهل.

أثناء دخولي إلى الموقع www.geocaching.com، قمت بالبحث عن مخابئ قريبة من بيتي في



وجدتها: إحدى لاعبات رياضة كشف المخبأ تعثر على جائزتها، بإرشاد من وحدة المنظومة GPS. وهي علبة مملوءة بالأشياء البسيطة والطريفة وضعت داخل حطبة مجوّفة.

الضاحية الشمالية من نيوجرسي. فعدّد لي الموقع ستة مخابئ في حدود أربعة أميال، حدّد كلا منها الشخص الذي أخفاها، كما أعطى إحداثيات موضع المخبأ. فاستعنت بواحد من محرّري *ساينتفيك أمريكان* ورحنا نفتش عن أقرب مخبأ بوساطة الأجهزة المحمولة الأربعة. وبعد أن أدخلنا إحداثيات المخبأ المنشود في كل جهاز، حددنا مسارا من منزلي إلى مكان المخبأ على الخريطة المعروضة على الشاشة. ثم تابعنا طريقنا سيرا على الأقدام في الاتجاه الذي تحدده الموصلة.

وأثناء سيرنا في مُتنزَّه مجاور، كانت الأجهزة «تُحدِّث» بشكل متواصل مسافتنا عن المخبأ. ومع أن جهازي الشركة Garmin يوفران عددا أقل من التحديثات مما يقدمه جهازا الشركة Magellan، فإنهما يقيسان المسافة بدقة أكبر، وللحصول على قراءات أكثر دقة لموضع المستخدم، يُفضل الوقوف بثبات مدة 10 ثوان إلى 15 ثانية في منطقة مكشوفة. وكان الخطأ المحتمل في هذه الرحلة يقارب 15 قدما فقط، لذلك لم يتطلب الأمر منا بعد بلوغ إحداثيات المخبأ إلا بضع دقائق من التفتيش للعثور على الكنز المخبأ.

على كل حال، فقد تعلمنا بسرعة أن الأجهزة لا تعمل جيدا في المدن المكتظة. فبإمكان إشارات المنظومة GPS اختراق السحب والزجاج والبلاستيك (اللدائن)، ولكن ناطحات السحاب تحجبها تماما. لذلك فإن أفضل دقة توصلنا إليها في وسط حي «مانهاتن» بلغت 150 قدما. ولكننا تمكّنا من العثور على قرص هيئة المساحة الوطنية الجيوديزية[3] إلى جانب المبنى الرئيسي للمكتبة العامة في نيويورك (فالأقراص النحاسية ـ التي يبلغ قطرها 3 بوصات، الموزّعة في أنحاء الولايات المتحدة ـ تسمح بالمسح الدقيق لأعمال الهندسة المدنية وعلوم رسم الخرائط).

بعد استكشاف دام شهرين، أصبحت متمرسا في رياضة كشف المخبأ، فقد حددت إلى الآن مواقع 96 مخبأ و27 قرص معْلم في أربع ولايات هي نيويورك ونيوجرسي وبنسلڤانيا وكونكتيكت، وفي ثلاثة بلدان هي الولايات المتحدة وكندا وإنكلترا. وأفضل الأجهزة المتقدمة على نظيراتها المبتدئة لتعدّد ميزاتها، فهي قادرة على اختزان أكثر من 100 معْلم. وأفضّل بشكل خاص من بين الأجهزة التي اختبرتها، أغلاها ثمنا؛ لأنها تعرض الخرائط ملونة، أي Magellan (Sportrak Color). ولما كانت الطرق والأنهار معروضة بألوان مختلفة في هذه الوحدة، فإنني لم أكن أخشى قط قيادة السيارة في أي زقاق متعرج.

على الرغم من نشاطي المفرط، يلزمني عمل وجهد كبيران للعثور على الكنوز المتناثرة على كوكب الأرض. فحسب موقع geocaching في شبكة الوب، يوجد حاليا 477 76 مخبأ في 190 بلدا، كما يوجد 10 000 شخص تقريبا يسعون إلى الكشف عنها. ويضاف إليها 50 مخبأ جديدا وسطيا كل أسبوع، وهذا ما يناسب تطلعاتي. ■

(1) waypoints
(2) disposable camera
(3) National Geodetic Survey disk

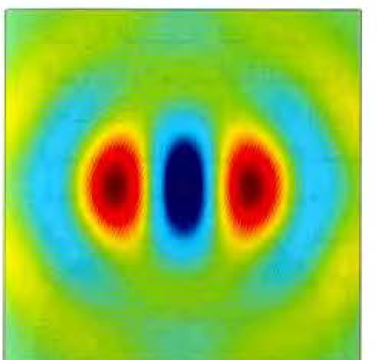
المؤلف

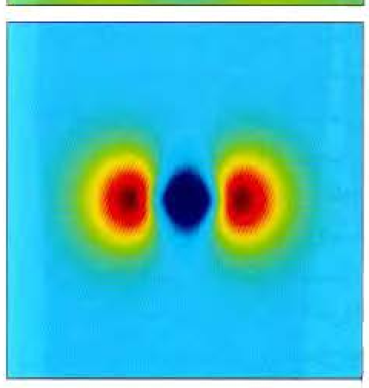
Mark Clemans

مساعد المدير الفني لدى مجلة ساينتفيك أمريكان

تصوير الجزيئات بالمسح الطبقي المحوسب(*)

إنتاج صور ثلاثية الأبعاد لمدارات الإلكترونات.





ينفق مدار الإلكترون في جزيء النتروجين كما صُوّر (*في الأعلى*) اتفاقا جيدا إلى حدّ ما مع المدار المحسوب من نماذج نظرية (*في الأسفل*). مقاس كل صورة هو 0.6 نانومتر في 0.6 نانومتر. وتمثل الألوان سعة الدالة الموجية الكمومية، ويرجح أن يكون الإلكترون موجودا في المواضع ذات اللون الأحمر والأزرق الغامق.

توصف الأجسام في العالم الكمومي(1) بواسطة الدوال الموجية(2) فالإلكترونات الموجودة حول الجزيء مثلا تكون في **مدارات** orbitals موجية الشكل، وهذه أشكال متفشية تعين الخواص مثل طاقة الإلكترونات ونزوع الجزيء إلى الإسهام في مختلف التفاعلات الكيميائية. لكن المدارات كائنات زلقة تتحدى، بسبب مبدأ الارتياب لهايزنبرك(3)، الجهود الروتينية المبذولة لتصويرها تصويرا كاملا ودقيقا. ولكن الباحثين في مجلس الأبحاث الوطني الكندي بأوتاوا حصلوا حاليا على مسح ثلاثي الأبعاد لمدار الإلكترون الخارجي حول جزيء النتروجين. و«سرعة الالتقاط» في طريقة التصوير كبيرة لدرجة تكفي لأن تمكّن يوما ما من أخذ مسوح لجزيئات وهي في منتصف تفاعلها الكيميائي.

وتستخدم المجموعة التي يرأسها «P. B. كوركم» و«D. M. فيلنوف» نبضة ليزرية لا تدوم سوى 30 فمتوثانية (3×10^{-14} ثانية). وخلال فترة النبضة الليزرية يهتز حقل الموجة الضوئية الكهربائي نحو عشر مرات. وكل اهتزازة تُبعد الإلكترون الخارجي لجزيء النتروجين عن الجزيء، ثم تعيده إليه.

ومع أنه يبدو أن الأمر يعتمد على الليزر لكي «ينير»(4) الإلكترون، فالواقع أن الإلكترون في طريق عودته نحو الجزيء، هو الذي يفعل فعل حزمة التصوير وبصورة أدق، يقوم حقل الليزر بإبعاد وتقريب جزء من دالة الإلكترون الموجية. ويمكن النظر إلى هذا وكأن الإلكترون موجود في مكانين في الوقت ذاته. فهو يبقى في الغالب في مكانه في مداره الأصلي حول النتروجين، ولكنه جزئيا يندفع مبتعدا.

يحوّل التسارع الحاد الموجة الإلكترونية المرتحلة إلى موجة مستوية، مثل نبضة منتظمة جميلة لحزمة إلكترونية ذات طول موجي قصير إلى أقصى حد - وهو بالضبط نوع الحزم المفيد في التصوير. وحين تعود الموجة المستوية وتقاطع الجزيء، فإنها تُحدث شكلا تداخليا مع الجزء المستقر من الدالة الموجية للإلكترون، مثل رتلين من الموجات يتقاطعان ويشكلان توزعا يشبه رقعة الشطرنج.

ولإكمال التصوير ينبغي كشف هذا الشكل التداخلي. فحين تسير الموجة المستوية فإن الشكل يهتز بسرعة، وهذا يجعله يُصدر إشعاعا فوق بنفسجي وهو الإشعاع الذي يرصده الباحثون. أما المعلومات عن ظل مدار الإلكترون كما تراه الموجة الإلكترونية المرتحلة فيُطبع على الانبعاث فوق البنفسجي. ويتطلب الحصول على صورة ثلاثية الأبعاد تكرار العملية بزوايا مختلفة، مثل الماسح الطبقي المحوسب في المستشفى. تضبط الزوايا بواسطة محاذاة جميع جزيئات النتروجين في العيّنة باستخدام نبضة ليزر أضعف قليلا قبل عدة بيكوثانية (10^{-12} ثانية) من وصول نبضة التصوير.

تتفق نتيجة التصوير اتفاقا جيدا جدا مع شكل مدار الإلكترون المحسوب(5) نظريا. يقول «F. كراوز» [من معهد ماكس پلانك للبصريات الكمومية بالقرب من ميونيخ]: «دهشت كثيرا حين رأيت صور المدارات الجزيئية التي تم الحصول عليها أول مرة. إن لهذه التقنية امكانات كبيرة.» وكانت مجموعة «كراوز» قد أوضحت في أواخر عام 2003 نوعا آخر من التصوير باستخدام نبضات مدتها 250 أتوثانية (2.5×10^{-16} ثانية) من الضوء فوق البنفسجي المتطرّف. وهذه أقصر نبضات ضوئية تم الحصول عليها حتى الآن. فالطريقتان متكاملتان - ففي طريقة «كراوز» يسهم ديناميك الإلكترونات الداخلية. أما في طريقة «كوركم» و«فيلنوف» فتسهم الإلكترونات الخارجية.

سيكون تطبيق التقنية على جزيئات أكثر تعقيدا أمرا مهما للغاية، وكذلك تطبيقه على جزيئات تكون خلال عملية انخراطها في تفاعل كيميائي. ويقول «فيلنوف» إنه يفكر في يوديد ثلاثي الفلورومتيل(6) الذي يمكن تحطيمه بواسطة نبضات من ليزر المجموعة. ويضيف: «ومن ثم نستطيع متابعة التفكك وقياس حركة الذرات.» ■

<P. G.> كولنز

(*) CT SCAN FOR MOLECULES
(1) quantum world
(2) wave functions
(3) Heisenberg's uncertainty
(4) light up
(5) computed
(6) trifluoromethyl iodide

كاليفورنيا، ها نحن قادمون(*)

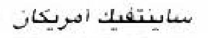
بعد انقضاء المسرحية الوثائقية حول **الاحترار العالمي** global warming بعنوان «**حقيقة مزعجة**» inconvenient truth وهي التي لاقت رواجا في صيف 2006، طرح السينمائيون قائمة تتضمن خطوات عملية يمكن لأي فرد أن يتخذها حيال هذه المشكلة البيئية المتفاقمة. ولعل أكثر الاقتراحات رواجا كان التالي: انتخب الزعماء الذين يأخذون عهدا على أنفسهم بحل هذه المعضلة. اكتب إلى مجلس النواب، وإذا لم يصغوا إليك جاهد للوصول إلى مجلس النواب. إن الحكومة الفدرالية هي لسوء الحظ متأخرة وراء حكومات أمم أخرى في الجهود للسيطرة على غازات الاحترار المناخي(1). ولهذا يأخذ رجال القانون حاليا زمام المبادرة. ففي الشهر 2006/8 أصدر المجلس التشريعي في كاليفورنيا مشروع قانون يدعو إلى تخفيض 25 في المئة من انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون و**غازات الدفيئة** greenhouse gases الأخرى بحلول عام 2020. وعلى الرغم من تعهد ولايات أخرى بإجراء تخفيض مماثل، فإن كاليفورنيا هي أول من فرض حدود الانبعاثات. كذلك حظي الاقتراح بدعم كل من المجلس التشريعي ذي الأغلبية الديمقراطية وحاكم كاليفورنيا <A. شوارزنكر>.

لقد اعترضت غرفة التجارة في كاليفورنيا على هذا المشروع القانوني مدعية أنه لن يؤثر بشكل مهم في المناخ العالمي، نظرا لأن الصناعات الملوثة ستعيد ببساطة نقل نشاطاتها إلى خارج الولاية. لكن هذه الحجة تستند إلى فرضية خاطئة، نظرا لأن تخفيض غازات الدفيئة لا يكلف غاليا؛ إذ إن تحسين مردود الطاقة في مصنع أو مبنى تجاري يؤدي إلى انقاص استخدام الكربون، وفي الوقت نفسه إلى توفير في النفقات. لقد ساعدت التقنيات المتقدمة الحديثة على توليد الكهرباء من مصادر متجددة للطاقة **كتوربينات (عنفات) الرياح** wind turbines و**المنظومات الحرارية الشمسية** solar-thermal systems و**منشآت الحرارة الأرضية** geothermal facilities بشكل منافس اقتصاديا لإنتاج الطاقة من حرق الفحم أو الغاز الطبيعي. ولقد نأت شركة الباسفك للغاز والكهرباء بنفسها عن بقية الشركات حين دعمت حدود الانبعاثات. وهذه الشركة تنتج حاليا 12 في المئة من إجمالي إنتاجها من الكهرباء من مصادر متجددة (باستثناء المحطات الكهرمائية الكبرى)، كما تخطط لزيادة تلك الحصة إلى 20 في المئة بحلول عام 2010.

ولعل الفضل الأكبر لقانون كاليفورنيا هو تشجيع ولايات أخرى على اتخاذ إجراءاتها الخاصة حيال الاحترار العالمي. فقد اتفق سبعة من حكام الولايات الشمالية الأمريكية ضمن **المبادرة الإقليمية لغاز الدفيئة** Regional Greenhouse Gas Initiative (كونكتكت، ديلاوير، ماين، نيوهمبشاير، نيوجرسي، نيويورك، فرمونت) على تخفيض انبعاثات غاز الدفيئة بمقدار 10 في المئة بحلول عام 2019. كما أصدرت المجموعة حديثا قائمة بالقواعد النمطية الواجب اعتمادها من قبل المجالس التشريعية في الولايات أو **الوكالات المقوننة** regulatory agencies. وفي هذه الأثناء أقامت اثنتا عشرة ولاية مجتمعة دعوى قضائية فدرالية ضد **وكالة حماية البيئة** Environmental Protection مفادها أن **قانون الهواء النظيف** Clean Air Act يتطلب من الوكالة **ضبط** regulate غازات الدفيئة. ويتوقع أن تصدر المحكمة العليا الأمريكية حكمها بهذا الشأن في هذا العام (2007).

يجب على شركات الطاقة في كاليفورنيا الحد من انبعاثات غاز الدفيئة فيها.

ولكن المحاكم الفدرالية يمكنها إحباط جهود الولايات بدل مساندتها، فقد سنت كاليفورنيا عام 2002 قانونا يدعو إلى تخفيض 30 في المئة من انبعاثات غاز الدفيئة من السيارات والشاحنات المباعة في الولاية. وبعد سنتين أقامت النقابات التجارية التي تمثل صناعة السيارات دعوى قضائية ادعت فيها أن التعليمات الصادرة تتعارض مع القانون، لأنها تفرض تحسينا في اقتصاد الوقود، وهذا الأمر هو من صلاحيات الحكومة الفدرالية التي لها وحدها الحق بفرض مثل هذه الضوابط. إننا نأمل بكل حماس أن ترفض المحاكم هذه الحجة وأن تقر الحق الأساسي للولايات في حماية مواطنيها من النتائج الكارثية للاحترار العالمي. ■



ساينتفيك امريكان



(*) CALIFORNIA, HERE WE COME

(1) climate-warming gases

اسألوا أهل الخبرة

كيف تختزن البطاريات[1] الكهرباء وكيف تفرغها؟[*]

يجيب عن هذا السؤال «K. بكل» [الباحث الزائر لمركز دراسات التصنيع المتكامل في معهد رونتشستر للتقانة]:

عندما توصل بطارية عادية بحمل، مثل مصباح إضاءة، تخضع هذه البطارية لتفاعلات كيميائية تحرر إلكترونات. فتسير هذه الإلكترونات عبر المصباح، ومن ثم تعود إلى البطارية (توجد أيضا أجهزة تختزن طاقة ميكانيكية، غير أنّ أكثر البطاريات شيوعا ـ كتلك المستعملة في الأضواء الكشافة وأجهزة التحكم من بُعد ـ تحتفظ بالطاقة في شكلها الكيميائي). يوجد داخل البطارية خلية كلفانية[2] واحدة على الأقل، تعطي ما بين صفر وبضعة فلطات، بحسب كيميائيتها. ففي بطارية السيارة، تكون الخلايا الست التي يسهم كلٌّ منها بفلطيْن، مربوطة على التسلسل، فتكوِّن بطارية ذات 12 فلط.

تتألف الخلايا الكهركيميائية جميعها من إلكترودين[3] تفصل بينهما مسافة محددة. ويكون الحيِّز بين الإلكترودين مملوءا بكهرليت[4] سائل أو صلب، يحتوي جسيمات مشحونة (أو أيونات). يُصْدِر أحد الإلكترودين ـ وهو الأنود[5] ـ إلكترونات سالبة الشحنة، ويتلقاها الآخر وهو الكاتود[6]. إنّ الاختلافات في الطبيعة الكيميائية بين الإلكترودين تؤدي إلى حدوث فرق في الطاقة (أو الكمون) يجعل الإلكترونات تتحرك من الأنود إلى الكاتود عبر الكهرليت. وعلى سبيل المثال، تستخدم خلية الرصاص الحامضية أكسيد الرصاص كاتودًا والرصاص أنودًا وحمض الكبريت (السائل) كهرليتًا. في هذه الحالة، يكوِّن حمض الكبريت بيئة تمطّ الروابط الكيميائية للرصاص وأكسيد الرصاص، بحيث تحدث تفاعلات الأكسدة والإرجاع في الوقت نفسه. ففي تفاعل الإرجاع ينزع الحمض الأكسجينَ من كاتود أكسيد الرصاص ويُحلّ محله الكبريتات. وبعدئذ يتّحد أيون الأكسيد مع الهدروجين (من الحمض) ليكوِّن الماء. أمّا عند الأكسدة فينزع حمض الكبريت الإلكترونين من الرصاص ويمسك بهما ليكوِّن كبريتات الرصاص. وإذا ما وصلت البطارية بحمل كهربائي، فإنّ الإلكترونات، التي تستبدلها الكبريتات، تنتقل خارج الخلية عبر الحمل معطية تيارا كهربائيا.

يمكن أن تستمر الخلية الكلفانية بإعطاء إلكترونات حتى تنفد المواد الكيميائية (الوسيطية)، وهي المركبات التي تقود تفاعلات الأكسدة والإرجاع، من أحد الإلكترودين أو من كليهما. ففي البطارية غير القابلة لإعادة الشحن، يكون التفاعل الكيميائي الذي أعطى الطاقة غير عكوس[7] بسهولة، وعندما تنفد المادة الكيميائية من الخلية تصبح الخلية غير قابلة للاستخدام. أمّا في البطارية القابلة لإعادة الشحن، مثل خلية الرصاص الحامضية، فالتفاعل عكوس؛ أي إنّ منبعا خارجيا للتيار الكهربائي المستمر يمكن أن يجبر الإلكترونات على الجريان من الكاتود إلى الأنود إلى أن يُعاد شحن الخلية. ■

«D. دودز»

(*) How Do Batteries Store and Discharge Electricity?

(1) أو المُدَّخِرات.

(2) galvanic cell

(3) electrodes أو مسريين.

(4) electrolyte أو إلكتروليت.

(5) anode أو المصعد.

(6) cathode أو المهبط.

(7) not reversible

(التحرير)

كيف يتمكن الهاكرز (قراصنة الحواسيب) من «ولوجها»؟[*]

يجيب عن هذا السؤال «J. C. H. ريان» [الأستاذة المساعدة في جامعة جورج واشنطن][1]:

ما يحدث فعلا هو أن القراصنة ينفذون إلى داخل نظام حاسوبي عن طريق استغلال مواطن الضعف الموجودة عمليا في برمجيات أو عتاديات كل نظام. وقبل الدخول في تفاصيل طرائقهم، لا بد من تعريف بعض المصطلحات الحاسوبية: فمصطلح «هاكر» (العابث) hacker مصطلح خلافي يستعمله بعضهم لوصف أولئك الذين تتجاوز اختراقاتهم للنظم الحاسوبية حدود المعرفة من دون القصد والتعمد في إلحاق الضرر، في حين يسعى «الكراكر» (المخترق) cracker إلى إيقاع نوع من الأذى أو التخريب. وإنني شخصيا أفضّل استعمال تعبير «المستخدم غير المخوَّل» unauthorized user (UU) لوصف كل من يلج النظم الحاسوبية ولوجا غير مشروع. علما بأن عملية «الولوج» تحتمل أحد ثلاثة معانٍ: إما النفاذ إلى معلومات مخزّنة في حاسوب، وإما استعمال قدرات المعالجة في جهاز حاسوبي خلسة (لإرسال مادة دعائية مثلا)، وإما احتجاز معلومات وهي في طريقها (مرسلَة) بين منظومتين.

فكيف إذًا ينفذ مستخدمٌ غير مخوَّل إلى الحاسوب؟ إن أيسر مواطن الضعف التي يمكن استغلالها كلمةُ مرور لم يُحسن اختيارها؛ إذ تستطيع برامج اختراق كلمات المرور تمييز مفردات وأسماء، معجمية، وحتى عبارات شائعة، في غضون زمن قصير لا يتجاوز الدقائق. وكثير من هذه البرامج قادر على تنفيذ «هجوم معجمي»، وذلك بأخذ نظام التشفير الذي استعمله نظامُ كلمة المرور، وتشفير كل كلمة في المعجم؛ ثم يحاول هذا المستخدم اختبار الكلمات المشفرة إلى أن يقع على النظير المطابق لكلمة المرور. أما إذا كان للنظام كلمة مرور معقدة، فقد يحاول هذا المستخدم تنفيذ «حيلة تقنية»، وذلك بالاستفادة من المعرفة التقنية لاقتحام نظام حاسوبي (بدلا من الخيارات غير التقنية من قبيل سرقة وثائق خاصة بنظام ما). وهذه الطريقة تنطوي على صعوبة أكبر، إذ يتعين على المستخدم غير المخول أولا معرفة نوعية النظام المستهدف وإمكاناته وبإمكانه، إذا كان خبيرا متمرسا، أن يفعل ذلك من بُعد بالاستعانة ببروتوكول لنقل النصوص الترابطية hypertext transfer protocol (http) للنفاذ إلى الوب web، حيث تدوَّن صفحات الوب عادة تطبيقَ المتصفح المستعمل. ومن ثم يستطيع العابث أن يكتب برنامجا يستغل هذا الإجراء، بل أن يجعل صفحة الوب تطلب مزيدا من المعلومات. وما إن تصبح هذه المعلومات في حوزته حتى يكتب برنامجا يتفادى وسائل الحماية الموجودة في النظام.

ومع أنه يتعذر عليك إزالة مواطن الضعف المحتملة جميعها، فإن بوسعك اتخاذ إجراءات وقاية من النفاذ غير المشروع: تيقن من استعمال أحدث الوصلات في نظام التشغيل والتطبيقات الخاصة بك. وأنشئ كلمة مرور معقدة تحتوي على مزيج من حروف وأرقام ورموز. وانظر في إمكان تركيب برنامج حماية خاص يعترض سبيل المنقولات غير المرغوبة الواردة من الإنترنت. واحرص كذلك على تجديد برمجياتك المضادة للفيروسات الحاسوبية، مع المراقبة المستمرة لدلائل ظهور فيروسات جديدة. وأخيرا احتفظ دائما بنسخة احتياطية عن بياناتك تمكنك من استرجاع المهم منها في الحالات الطارئة. ■

«D. إكثوكا»

(*) How do computer hackers 'get inside' a computer?

(1) وشاركت في تأليف كتاب Hackers, Crackers, Spies and Thievess